

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**La técnica de correlación de imágenes digitales aplicada a  
ensayos de materiales**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL  
GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTOR**

Diego Alejandro Vera Cieza

**ASESOR:**

Dr. Francisco Aurelio Rumiche Zapata

Lima, Agosto, 2020

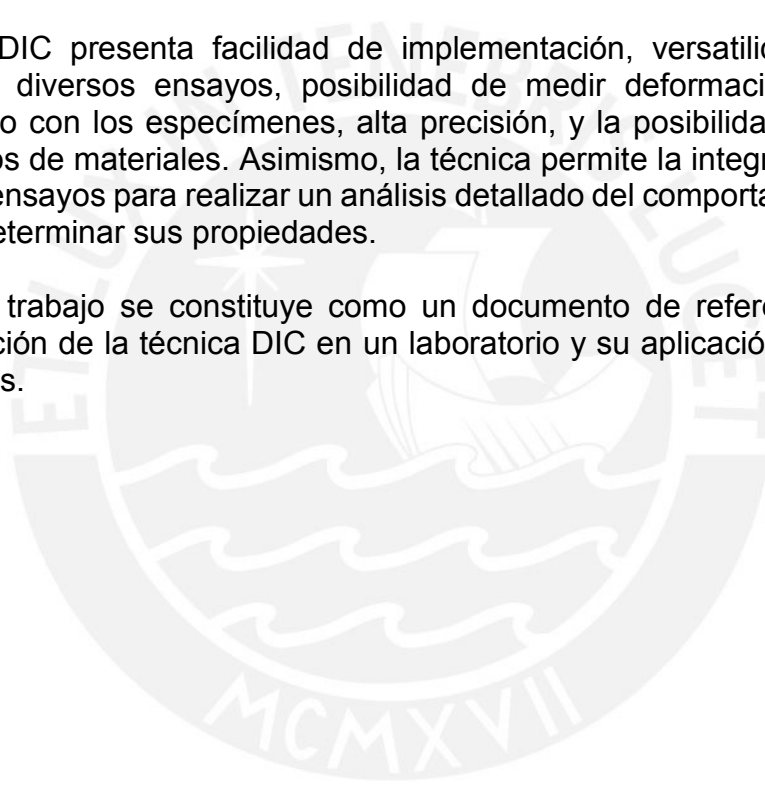
## **RESUMEN**

La correlación de imágenes digitales (*Digital Image Correlation: DIC*) es una herramienta moderna de la ingeniería que permite visualizar y medir en tiempo real el movimiento y las deformaciones de diversos sistemas mecánicos.

El objetivo del presente trabajo es realizar una investigación de la literatura técnica enfocada en la aplicación de la técnica DIC en ensayos de materiales. El trabajo contempla la descripción de los fundamentos y principios de funcionamiento de la técnica, así como del equipamiento necesario y los procedimientos empleados para realizar una medición. Asimismo, se presenta una recopilación de trabajos desarrollados por investigadores en el campo de DIC y ensayos de materiales, resaltando el equipo empleado, los ensayos y materiales utilizados, y los resultados obtenidos.

La técnica DIC presenta facilidad de implementación, versatilidad para ser aplicada en diversos ensayos, posibilidad de medir deformaciones en 3D, contacto nulo con los especímenes, alta precisión, y la posibilidad de ensayar diversos tipos de materiales. Asimismo, la técnica permite la integración con los equipos de ensayos para realizar un análisis detallado del comportamiento de un material y determinar sus propiedades.

El presente trabajo se constituye como un documento de referencia para la implementación de la técnica DIC en un laboratorio y su aplicación en ensayos de materiales.



## **Tabla de contenido**

<b>1. Introducción:</b>	<b>4</b>
<b>2. Generalidades:</b>	<b>5</b>
2.1. Antecedentes:	5
2.2. Componentes:	6
2.3 Preparación estándar de un experimento usando DIC:	8
<b>3. Objetivos:</b>	<b>9</b>
<b>4. Casos</b>	<b>10</b>
<b>Caso 1:</b> Evaluación mediante correlación de imágenes digitales del comportamiento de materiales compuestos fabricados mediante VARTM (moldeo por transferencia de resina asistida por vacío, por sus siglas en inglés) o SCRIMP (proceso Seeman por infusión de resina de moldeo) realizando ensayos de tracción y compresión	10
<b>Caso 2:</b> Ensayos de compresión en polímeros reforzados por fibra de carbono anisotrópicos (CFRP) usando DIC para obtener el mapa de deformación y caracterizar un posible pandeo del material	15
<b>Caso 3:</b> Identificación de mecanismos de fractura y resistencia a la misma en biomateriales (escamas de pangolines y concha de nácar) usando DIC	18
<b>Caso 4:</b> Estudio de mecanismos de falla del concreto reforzado con fibras de acero al variar su resistencia a la compresión y la cantidad de acero, bajo un ensayo de tracción indirecta (splitting test) usando correlación de imágenes digitales	21
<b>Caso 5:</b> Caracterización y evaluación de propiedades mecánicas de una resina epóxica EPON E 863 mediante ensayos a tracción, flexión y compresión, al variar la velocidad de deformación y la geometría de las probetas, usando correlación de imágenes digitales	24
<b>Caso 6:</b> Estudio de diferentes características como distribuciones de esfuerzo cortante, estados de deformación, variaciones por tasa de deformación y punto de inicio de fractura de materiales de polipropileno cuando son sujetos a ensayos de corte, analizados con correlación de imágenes digitales y simulaciones numéricas.	29
<b>Caso 7:</b> Caracterización del material IM7-8552 carbono-epóxica unidireccional en compresión transversal y corte en el mismo plano usando DIC	32
<b>Caso 8:</b> Correlación de imágenes digitales en análisis de rigidez en zonas locales de juntas soldadas	35
<b>Caso 9:</b> Correlación de imágenes digitales para analizar los esfuerzos locales de elementos fabricados de Ti6Al4V por EBM (electron beam melting)	37
<b>Caso 10:</b> Estudio experimental de deformabilidad de columnas de capas de vidrio a compresión central y flexión usando correlación de imágenes digitales con cargas cuasiestáticas	40

**Caso 11:** Generación de un diagrama límite de formación (FLD, por sus siglas en inglés) mediante el uso de ensayos de tracción uniaxiales y con muesca para deformaciones en el mismo plano de deformación usando correlación de imágenes digitales 43

**Caso 12:** Determinación del material requerido en las pestañas de agarre de láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) en ensayos a tracción, usando DIC 45

**Caso 13:** El uso de correlación de imágenes digitales para identificar características de falla de madera laminada cruzada (CLT) bajo carga transversal 48

**Caso 14:** Determinación del módulo de corte coplanar a probetas de plásticos reforzados con fibra de carbono unidireccionales utilizando correlación de imágenes digitales 51

**5. Conclusiones:** 53

**6. Bibliografía:** 54



## 1. Introducción:

La correlación de imágenes digitales (DIC por sus siglas en inglés) es una técnica óptica de medición de deformaciones, que se caracteriza por realizar mediciones de tipo *full field measurement*, es decir que efectúa mediciones sin contacto físico al tomar varios puntos de referencia en toda la superficie de una probeta, lo cual provee una mayor precisión en la medición de deformaciones [1]. Esta técnica presenta numerosas ventajas con respecto a las técnicas tradicionales, entre las cuales se puede destacar su capacidad de obtener mayor información sobre la deformación en un mismo ensayo, la simplicidad de montaje e implementación y la minimización de errores, los cuales suelen ocurrir en los ensayos realizados por técnicas de contacto debido a los deslizamientos de extensómetros, galgas extensiométricas u otro tipo de sensor de deformación [2]. Además, según Golberg [3] se evitan las concentraciones de esfuerzo usuales en los puntos de contacto de dispositivos de contacto.

Por otro lado, la técnica DIC también presenta ciertas desventajas, tales como el elevado costo del equipo, el cual puede resultar restrictivo cuando los recursos son limitados; además, el tamaño y peso de las cámaras y lentes son considerados como un problema ya que pueden aumentar de acuerdo al requerimiento del ensayo; finalmente, esta técnica carece de la capacidad de realizar todo tipo de ensayo con un solo tipo de lentes, lo que incrementa aún más el costo en caso de que el experimento necesite lentes que no estén disponibles en el momento [4]. Adicionalmente, los mismos componentes del equipo DIC pueden ocasionar errores en las mediciones de deformación cuando los factores ambientales no son correctamente considerados; por ejemplo, temperaturas excesivas pueden afectar al sensor de la cámara y generar imágenes que no representan la deformación real; asimismo, si se usara la técnica DIC en configuración bidimensional y al mismo tiempo ocurriese una deformación fuera del plano de la superficie de la probeta, los resultados no serían correctamente interpretados [5]. De la misma manera, otra de las desventajas que presenta la técnica DIC se debe a que la probeta debe tener una superficie capaz de ser captada por las cámaras, lo cual no siempre ocurre, por ejemplo, cuando se realiza la medición de deformaciones extremas, donde la probeta se estira fuera del campo de visión de las cámaras, o experimentos cuyas probetas tengan superficies reflectivas que no puedan ser tratadas con un recubrimiento superficial. Asimismo, cuando un material ensayado tienda a presentar múltiples fracturas durante el ensayo crea una dificultad al procesar las imágenes, debido a que las fracturas afectan la continuidad necesaria en la superficie para tener referencias necesarias para el cálculo de deformaciones.

Finalmente, esta técnica se aplica en la actualidad con frecuencia para realizar ensayos de materiales, de los cuales una gran cantidad se relacionan con resolver problemas de diseño en estructuras o en geometrías relativamente complejas. Además, también tiene aplicaciones, en menor medida, en la inspección y manufactura industrial. La industria aeroespacial, de biomateriales y aquellas otras que requieren mediciones a niveles micro, han aumentado progresivamente su dependencia a esta técnica para realizar ensayos de materiales. Vale la pena mencionar que para poder comparar esta técnica con otros métodos convencionales como el uso de galgas extensiométricas, ambos procedimientos suelen ser usados a la par [6].

## 2. Generalidades:

### 2.1. Antecedentes:

La correlación de imágenes digitales (DIC) inició como un concepto hace más de cuatro décadas; sin embargo, en el año 1979 se consiguió emplear un algoritmo de correlación exitoso que permitiese usar esta técnica, la cual fue capaz de incorporar la determinación de referencias de puntos de medición en la probeta, al mismo tiempo que medía la deformación entre ellas. Eventualmente, con el mejoramiento continuo de dicha técnica, se empezaron a descubrir aplicaciones prácticas, lo cual dio inicio a la aplicación de ensayos de materiales usando DIC [7].

Es importante mencionar que a lo largo de la historia se realizaron estudios que sirvieron como pioneros para perfeccionar el uso de la técnica DIC. En el año 1983, Peters [8] aplicó la técnica para obtener velocidades de rotación en un cuerpo rígido, dos años más tarde Chu [9] realizó una investigación que permitía verificar la aplicabilidad de la correlación de imágenes digitales a probetas de aluminio, la cual consistió en un primer ensayo donde trasladó el objeto para verificar que la técnica DIC medía correctamente la distancia trasladada, luego hizo lo mismo con rotación simple y finalmente comprobó la aplicabilidad de un ensayo de tracción. Por otro lado, en 1987, Metwalli [10] aplicó satisfactoriamente la técnica DIC a platinas metálicas sometidas a ensayos de tracción uniformes aún cuando las deformaciones eran elevadas, estos resultados fueron comparables con los ensayos realizados por la microscopía de la época; sin embargo la técnica DIC contaba con la ventaja de ser una técnica computarizada. En el año 1989, Peters [11] aplicó la técnica DIC a cilindros a presión de materiales compuestos con la finalidad de detectar fallas prematuras sin necesidad de realizar un ensayo destructivo. Sin embargo, encontró dificultades por ruido excesivo ocasionado por deformaciones fuera del plano causadas presumiblemente por la presión interna de dichos cilindros, esta investigación dio lugar a pensar en maneras más efectivas de realizar DIC, como el uso de cámaras adicionales o grupos de cámaras en distintas posiciones, de esta manera el equipo sería capaz de captar deformaciones en todas las direcciones posibles. En 1990, Turner [12] aplicó la técnica DIC en metales para medir estrés térmico a altas temperaturas y comparar sus resultados con los obtenidos por galgas extensiométricas. Años más tarde, Reynolds [13] usó la técnica DIC para realizar mediciones de deformación en probetas soldadas en la región de la ZAC (zona afectada por calor), superando (bajo opinión del autor) a softwares de simulación de la época, debido a que al usar esta técnica no se necesita conocer propiedades a priori, y se puede caracterizar correctamente el material de aporte de soldadura sin necesidad de definirlo; de lo contrario a lo que ocurría cuando se usaba un software de la época. Con lo descrito con anterioridad, se resume la historia de las primeras aplicaciones más resaltantes de la técnica DIC en ensayos de materiales.

## 2.2. Componentes:

Los equipos de correlación de imágenes digitales requieren de ciertos componentes necesarios para aplicar la técnica. En primer lugar, se requieren cámaras para registrar las deformaciones de la probeta durante el ensayo; la cantidad requerida de cámaras puede oscilar entre 1 o 2 dependiendo del tipo de deformación que se necesite medir y deben incluir lentes seleccionados adecuadamente para cada caso. Además, las cámaras se apoyan en fuentes de iluminación, que presentan una cantidad de focos variable de acuerdo a las necesidades de iluminación de cada ensayo. Asimismo, se precisa de un equipo de montaje, el cual debe sostener las cámaras y equipos de iluminación, y ser flexible para adaptarse a diferentes requerimientos ópticos (diferentes distancias y orientaciones entre las cámaras y la probeta) [14]. Todos los componentes mencionados anteriormente suelen ser suministrados en conjunto por distintos proveedores al adquirir un equipo de correlación de imágenes digitales, con configuraciones adaptables a la realización de ensayos con condiciones especiales como pueden ser ensayos a alta velocidad, con alta necesidad de procesamiento, etc.

Por otro lado, con la finalidad que el software de correlación de imágenes funcione adecuadamente se necesita de un digitalizador de señales, que convierta lo observado por las cámaras a señales que puedan ser leídas posteriormente. Para ello se requiere de un computador, cuya capacidad de cómputo depende de la complejidad de ensayos a realizar y el nivel de precisión deseado. Este instrumento se asiste de un sistema de almacenamiento, con facilidades para exportar los datos procesados (aunque esta posibilidad depende de la voluntad del fabricante), y en un núcleo de procesamiento de imágenes (**Figura 1**). El trabajo de este computador, auxiliado por los otros elementos, permite obtener una salida de resultados procesados en formatos como gráficos, reportes e informes adecuados para discusiones en ingeniería o ciencia [9].

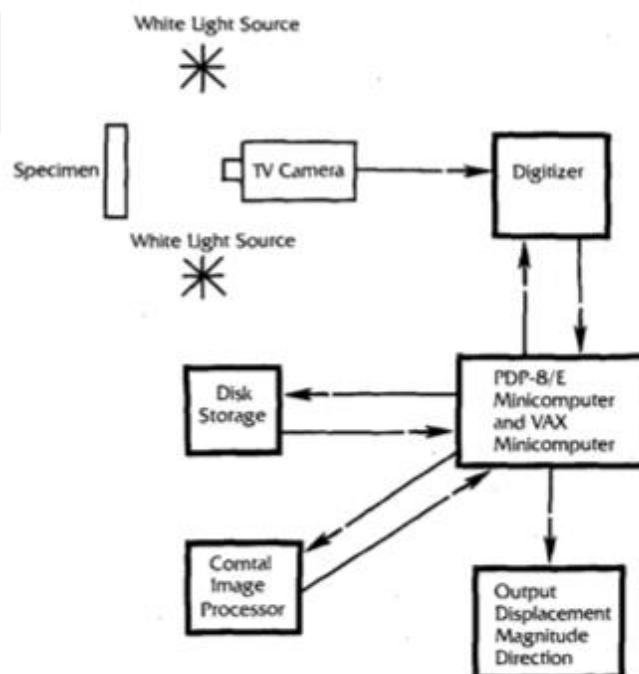
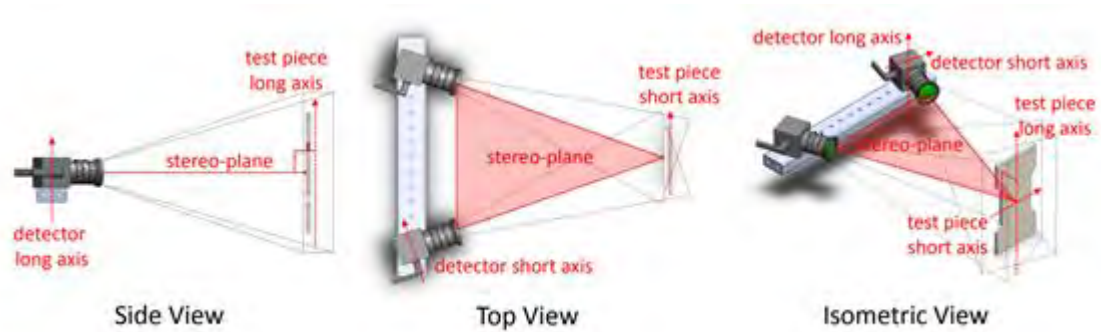


Figura 1. Esquema de una configuración experimental para un análisis de correlación [9].

Como se puede observar en la **Figura 2**, el set-up de las cámaras es de suma importancia para que el ensayo resulte exitoso. Para todas las pruebas realizadas con la técnica DIC es necesaria la obtención de un ángulo de  $90^\circ$  entre el plano estéreo formado, el cual se muestra en rojo en la **Figura 2**, y la superficie de la probeta. Este ángulo es importante para que las cámaras puedan registrar correctamente las deformaciones en la superficie de la probeta, la cual es usualmente tratada con un recubrimiento superficial [15].



*Figura 2. Imagen que describe la orientación ideal de las cámaras de un equipo DIC, respecto a la región de interés [15].*

A manera de ejemplo, la **Figura 3** exhibe al equipo GOM ARAMIS 5M, propiedad de la empresa GOM, señalando los componentes tratados a lo largo de esta sección.



*Figura 3. Componentes principales del equipo DIC GOM ARAMIS 5M. 1) Cámaras. 2) Iluminación. 3) Trípode. 4) Digitalizador de señales. 5) Computador Fuente: GOM.com*



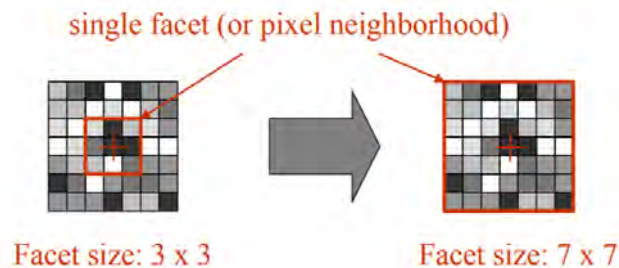
### 2.3 Preparación estándar de un experimento usando DIC:

Para realizar un ensayo utilizando la técnica DIC se necesitan pasos previos para que el experimento se desarrolle exitosamente. Se empieza por la preparación de la probeta que es necesaria para que el software funcione adecuadamente. Luego, se procede al set-up del experimento, el cual es modificado dependiendo de la naturaleza de la probeta analizada y el tipo de deformación esperada (tipo de ensayo), esta información es relevante para realizar la calibración del software correctamente. Finalmente, se definen parámetros para procesar las imágenes adecuadamente, los cuales varían de acuerdo al material, geometría de la probeta, fuerza aplicada, etc. [16]. A continuación, se presenta una descripción de los pasos mencionados anteriormente en el orden en el cual se desarrollan.

**Preparación de la probeta:** Primero, se eliminan residuos de productos propios del proceso de fabricación utilizando un agente de limpieza, luego se rocía pintura negra o blanca sobre la muestra para formar un fondo uniforme y posterior al secado de la primera pintura se rocía un patrón de puntos, del color contrario al rociado inicialmente, de forma aleatoria, el tamaño de estos puntos debe ser del mismo tamaño que los que aparecen en los patrones de calibración del software [16].

**Preparación (set-up) del experimento:** Inicialmente, se calibra el equipo con objetos de calibración del tamaño de la región de interés (ROI), es decir la región de la probeta que se quiere medir, la cual debe estar contenida dentro de las dimensiones del objeto de calibración, este debe ser seleccionado acorde al tamaño de la probeta. El proceso de calibración le da al software la capacidad de medir dentro de una región determinada, utilizando como referencia las caras del tamaño del objeto de calibración, el cual usualmente tiene forma cúbica [16].

**Definición de parámetros del experimento:** El tamaño de la faceta (o tamaño de una vecindad de píxeles), paso de la faceta y base de cálculo (o tamaño de la matriz computacional de desplazamiento) son parámetros de entrada que varían dependiendo de las condiciones o necesidades del experimento; por ejemplo, al aumentar el tamaño de la faceta (**Figura 4**) se mejora la precisión del reconocimiento de los puntos, sin embargo, aumenta el tiempo de cómputo. Por otro lado, al incrementar el paso de la faceta (**Figura 5**) se mejora la precisión y exactitud local de las deformaciones calculadas, pero se pierde en sensibilidad a las variaciones locales de deformación. Por último, con el aumento de la base de cálculo (**Figura 6**) se mejoran la precisión y exactitud local, una base usual a usar es de 3 píxeles pero puede incrementarse por requerimiento a 5 o 7 [16].



*Figura 4. Incremento del tamaño de la faceta [16].*

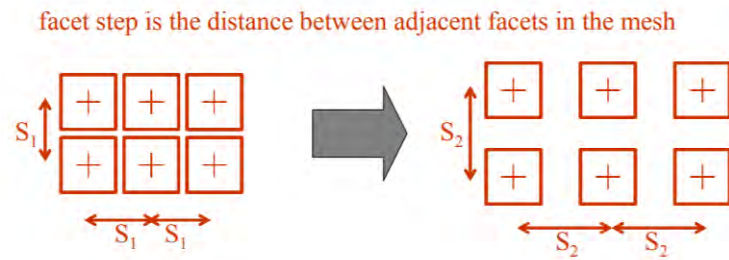


Figura 5. Incremento del paso de la faceta [16].

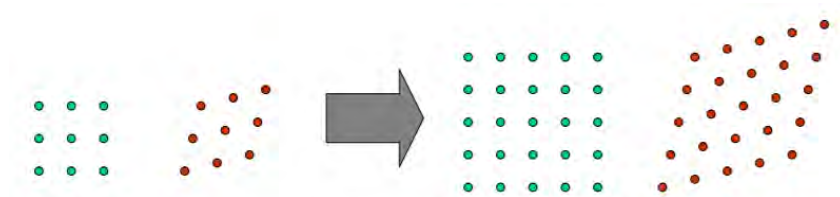


Figura 6. Incremento de la base de cálculo [16].

### 3. Objetivos:

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es desarrollar una revisión de la literatura técnica y el estado del arte, para generar un texto referencial que evidencie el uso de la técnica de correlación de imágenes digitales en ensayos de materiales de diversa índole.

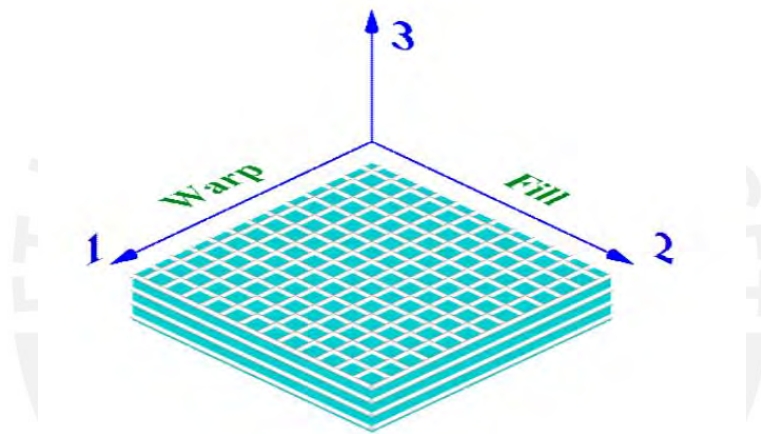
Los objetivos específicos se expresan a continuación:

- **Investigar** diversas aplicaciones de la técnica DIC en distintos materiales y tipos de ensayo.
- **Determinar** los parámetros y equipamiento usado para cada tipo de ensayo realizado.
- **Presentar** de manera resumida distintos casos de aplicación con los resultados obtenidos.
- **Generar un** texto como **fuentes de consulta** para aplicación de la técnica DIC en ensayos de materiales.

## 4. Casos

**Caso 1:** Evaluación mediante correlación de imágenes digitales del comportamiento de materiales compuestos fabricados mediante VARTM (moldeo por transferencia de resina asistida por vacío, por sus siglas en inglés) o SCRIMP (proceso Seeman por infusión de resina de moldeo) realizando ensayos de tracción y compresión [16].

- a) Material evaluado: En este caso se utilizó un material compuesto de tipo FRP (polímero reforzado con fibras) en paneles tejidos de vidrio clase E/vinil-éster, el cual tenía un espesor de 4.9 mm. El refuerzo de la fibra se tejió con un peso por unidad de área de 814 kg/m<sup>2</sup> y el modelo de fibra fue un Saint Gobain Verotex 324. La urdimbre y la trama contenían el 55% y 45% del peso total de la fibra, respectivamente. En la dirección de la urdimbre las hebras estaban separadas 5.1 mm y en la dirección de la trama, 6.4 mm. Las probetas consistían de 8 capas de refuerzo por fibras, con las hebras de la urdimbre colocadas en paralelo. La resina polimérica seleccionada fue una Dow Derakane 8084. Esta corresponde a las resinas usadas en aplicaciones navales. En la **Figura 7** se puede observar una referencia de la distribución de las fibras de material en el sistema de referencia usado en el ensayo.



*Figura 7. Sistema de referencia coordenado de la probeta [16].*

- b) Ensayos realizados: Se emplearon cuatro ensayos con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas del FRP, desarrollados en base a su respectiva normativa.
- ASTM D3039: Propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica.
  - ASTM D638: Propiedades de tracción de plásticos.
  - ASTM D6641: Determinación de las propiedades de compresión de laminados compuestos de matriz polimérica usando un ensayo de compresión de carga combinada.
  - ASTM D695: Propiedades a la compresión de plásticos rígidos.

En la **Tabla 1** se resumen las propiedades medidas en cada ensayo:

Test	Coupon	ASTM	Properties
Tension (composites)	tabbed rectangular	D3039	$E_1, E_2, \nu_{12}, F_{1t}, F_{2t}$
Tension (plastics)	dumbbell	D638	$E_1, E_2, \nu_{12}, F_{1t}, F_{2t}$
Compression (composites)	rectangular	D6641	$E_1, E_2, F_{1c}, F_{2c}$
Compression (plastics)	tabbed rectangular	D695	$E_1, E_2, F_{1c}, F_{2c}$

Tabla 1. Propiedades medidas según el tipo de ensayo [16].

- c) Equipamiento: El equipo utilizado en este ensayo para la medición del desplazamiento fuera del plano superficial de la probeta fue el equipo de correlación de imágenes digitales GOM ARAMIS de doble cámara, para conseguir un efecto estereoscópico (3D).
- d) Resultados: Se obtuvieron curvas esfuerzo/deformación de los ensayos realizados. Sus respuestas en tracción y compresión fueron modeladas mediante una relación bilineal. Usando DIC se obtuvieron módulos de elasticidad iniciales y finales en las direcciones de la urdimbre (Figura 8) y trama (Figura 9), los cuales son representados como  $E_1$  y  $E_2$  respectivamente. En todos los ensayos se encontró un punto de inflexión para ambos módulos de elasticidad.

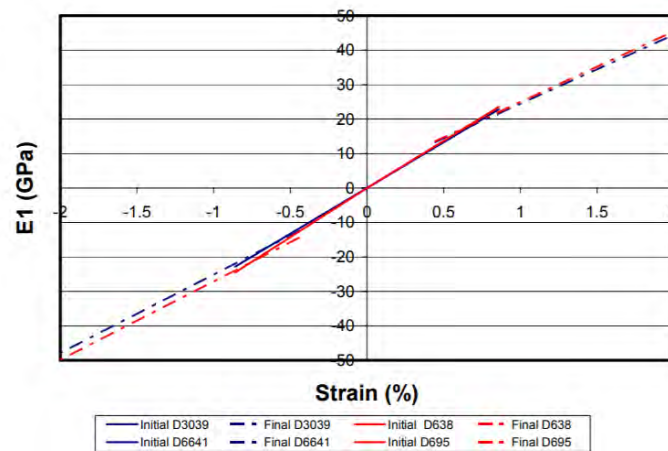


Figura 8. Aproximación bilineal de esfuerzo-deformación en la dirección de la urdimbre [16].

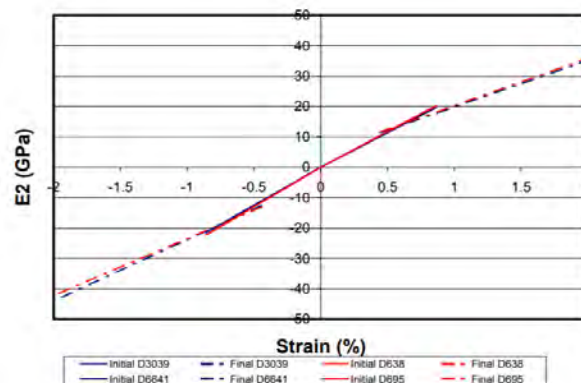


Figura 9. Aproximación bilineal de esfuerzo-deformación en la dirección de la trama [16].

En la **Figura 10** y **Figura 11** se pueden observar las mediciones de campo completo de deformaciones obtenidas mediante DIC de los ensayos a tracción usando los estándares ASTM D3039 y ASTM D638. Dichas figuras presentan variaciones locales de deformación, las cuales se presume que se debían a variaciones en el tejido del material ensayado.

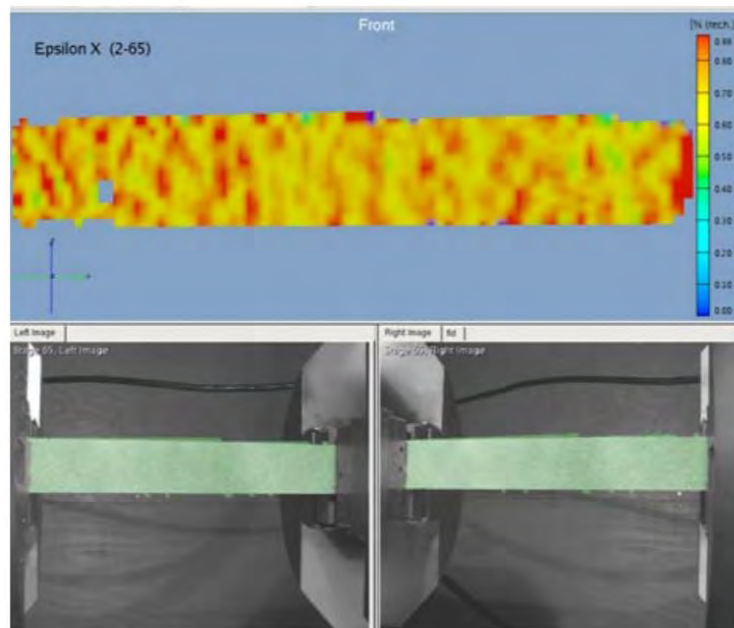


Figura 10. Superior: Campo de deformaciones del ensayo ASTM D3039. Inferior izquierda: Imagen captada por la cámara izquierda. Inferior derecha: Imagen captada por la cámara derecha [16].

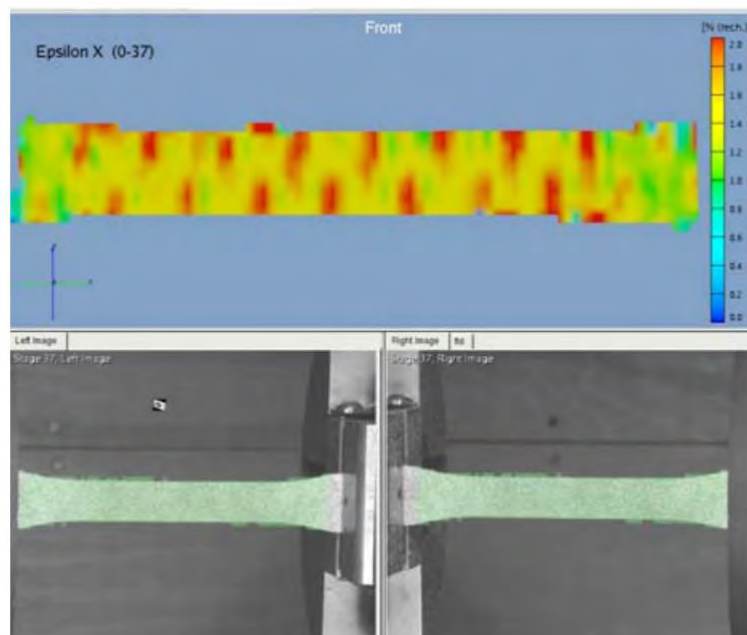


Figura 11. Campo de deformaciones del ensayo ASTM D638 [16].



Asimismo, se obtuvieron resultados de los ensayos usando los estándares ASTM D6641 y ASTM D695, ambos de compresión. En estos ensayos se evidenció una concentración de esfuerzos alta en los puntos de apoyo en la mordaza, además se observó que al fallar por compresión se tenían desplazamientos diagonales cercanos a dicha zona, como se observa en la **Figura 12** y **Figura 13**.

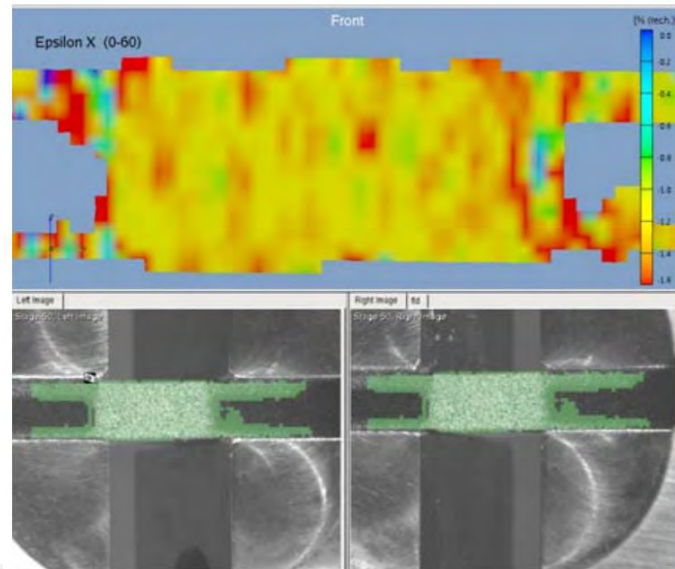


Figura 12. Superior: Campo de deformaciones del ensayo ASTM D6641. Inferior izquierda: Imagen captada por la cámara izquierda. Inferior derecha: Imagen captada por la cámara derecha [16]

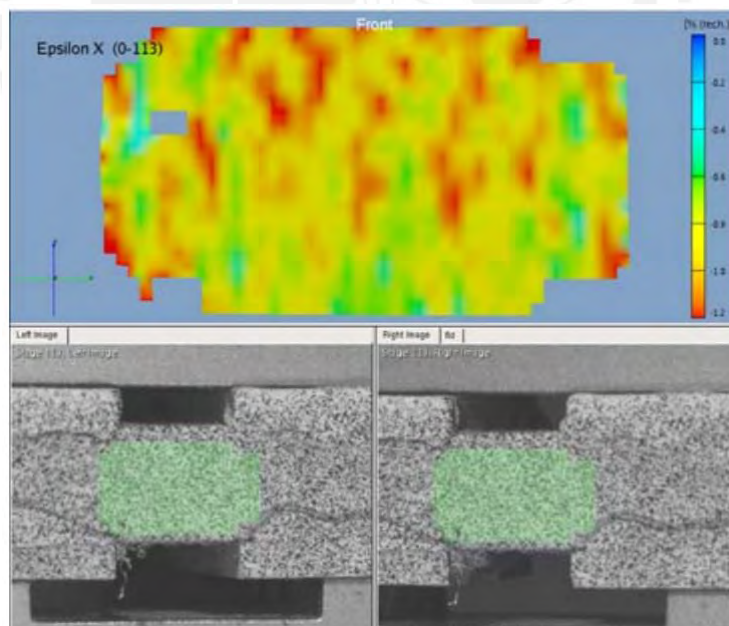
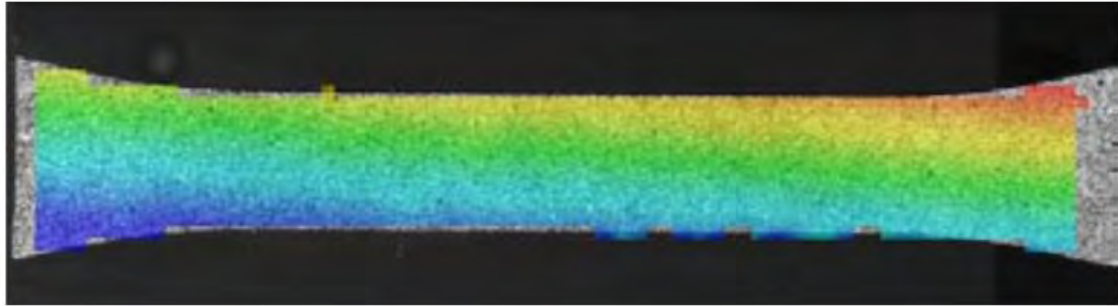


Figura 13 Superior: Campo de deformaciones del ensayo ASTM D695. Inferior izquierda: Imagen captada por la cámara izquierda. Inferior derecha: Imagen captada por la cámara derecha [16].

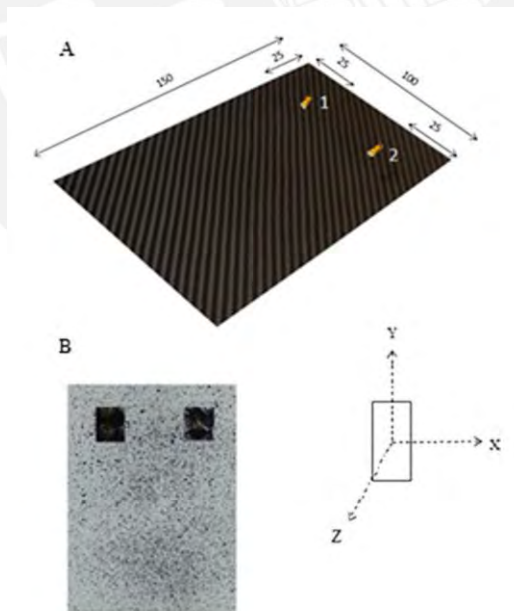
Finalmente, durante el ensayo a tracción ASTM D638, se observó un error de alineación, el cual fue evidenciado debido a una pequeña torsión innecesaria detectada por el DIC al medir las deformaciones en el plano saliente, dicha torsión se demuestra en la **Figura 14**, al observar que las líneas de colores no son totalmente horizontales, pues estas indican un campo de deformación no uniforme, contrario a la uniformidad que debería estar presente en un ensayo a tracción usual.



*Figura 14. Detección de torsión durante el ensayo D638 [16].*

**Caso 2:** Ensayos de compresión en polímeros reforzados por fibra de carbono anisotrópicos (CFRP) usando DIC para obtener el mapa de deformación y caracterizar un posible pandeo del material [17].

- a) Material evaluado: En el presente caso el material analizado fue un laminado compuesto de una matriz de epoxy reforzada con fibra de carbono. El tamaño de la pieza sometida a compresión uniaxial fue de 150 mm x 100 mm x 5 mm. Su geometría se observa en la **Figura 15**.



*Figura 15. A) Material compuesto analizado B) Material compuesto una vez puesto el patrón [17].*

- b) Ensayos realizados: Se llevaron a cabo ensayos de compresión según la norma ASTM 7137, definida para materiales compuestos.

- c) Equipamiento: La máquina de aplicación de fuerza empleada fue una servo-hidráulica SCHENCK. Además, se usaron galgas extensiométricas con largo inicial ( $l_0$ ) 3 mm, factor de galga ( $k$ ) de 1.99 y resistencia eléctrica ( $\Omega$ ) de 350. El sistema DIC empleado fue "Dynamics Q400" con el software "ISTRA 4D". Este sistema incluye dos cámaras MANTA con lentes RICOH de 16 mm. Además, se utilizó un sistema de adquisición de datos de 4 canales, una unidad sincronizadora y una fuente de luz. La **Figura 16** representa el *set-up* del experimento.

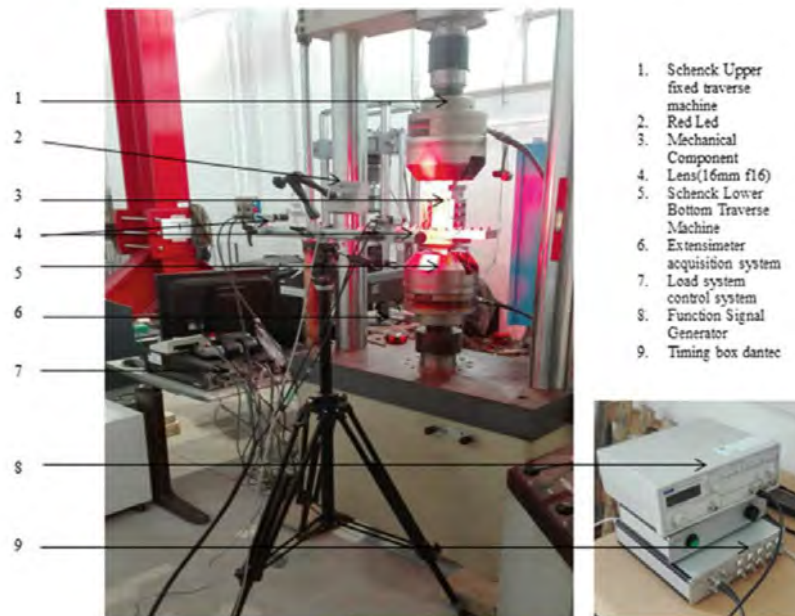


Figura 16. Set-up del experimento [17]

- d) Parámetros de ensayo: El ensayo es monotónico (con carga siempre en aumento), la máxima carga fue 250 kN y la velocidad de aplicación de la misma fue de 1.25 mm/min, con una frecuencia de adquisición de datos en la servo-hidráulica SCHENCK de 10 Hz. En el set-up del sistema DIC se tomó una distancia entre cámaras de 40 cm, una distancia entre lentes y probeta de 50 cm, un ángulo de inclinación de cámaras respecto al eje perpendicular del espécimen de  $21.8^\circ$  y una apertura de f/8 en las cámaras. En el ensayo de CAI (compresión después del impacto por sus siglas en inglés), el sistema DIC usó una velocidad de adquisición de datos de 1 Hz. Se seleccionó un tamaño de faceta de 19 píxeles y una precisión de 0.1 píxeles.
- e) Procedimiento: El patrón empleado para la técnica DIC se logró rociando pintura blanca mate y, posterior a que esta seque, se salpicó pintura negra mate tal que se presentó un patrón de puntos aleatorios, ambas pinturas se aplicaron a través de un aireador. Además, se emplearon cuatro galgas extensiométricas eléctricas (dos en cada lado) para poder medir la deformación local debido a la compresión y así comparar dichos resultados con los resultados de la técnica DIC. Luego, se empleó una señal dada por el inicio de la carga en la máquina para sincronizar la adquisición de datos con la máquina encargada de cargar la probeta.
- f) Resultados: La finalidad de este ensayo (CAI) fue evaluar el pandeo del elemento en cuestión, para ello el arreglo estereoscópico de las cámaras se encargó de analizar la deformación en el plano saliente respecto al plano de las cámaras. En la **Figura 17** se captura el campo de deformación de la probeta a diferentes tiempos para poder saber el instante en el que pandee; se observó que en el segundo 120 ocurre una fractura.



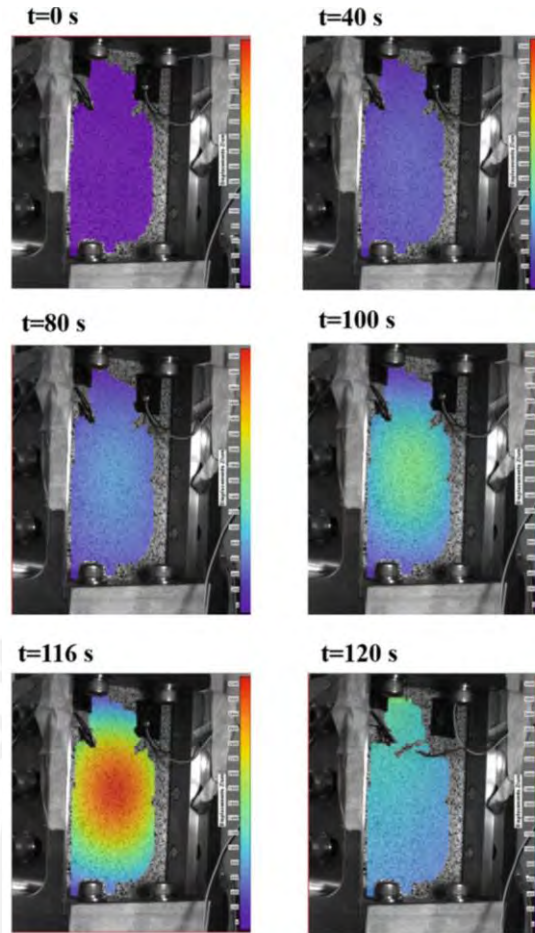


Figura 17. Desplazamientos fuera del plano a diferentes tiempos según DIC [17].

Además, el objeto se encontró sujeto a compresión uniaxial; asimismo, tuvo un error residual 3D (una medida propia del software) menor a 0.4 píxeles, según el software en modo de alta precisión, y en la región de interés se localizaron 1180 intersecciones de cuadrícula.

También se obtuvieron las deformaciones presentadas por la probeta a distintos tiempos durante el ensayo mediante la técnica DIC (**Figura 18**). Se observaron deformaciones a lo largo de la sección transversal de la probeta, donde se evidenció una distribución simétrica, en la cual la deformación se volvió positiva (el material se estira) solamente al centro de la probeta.

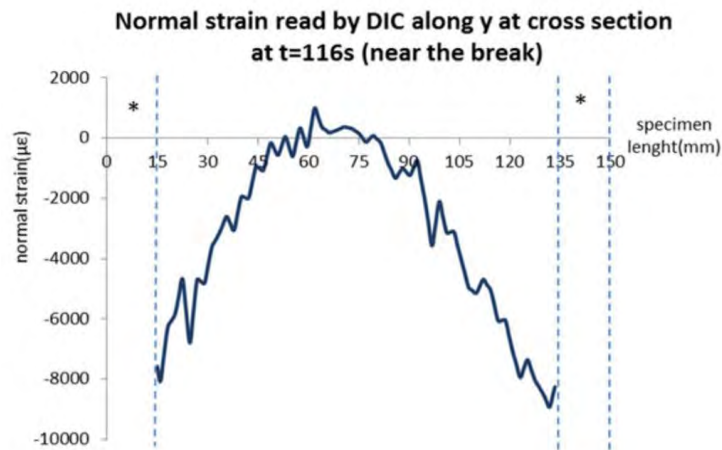
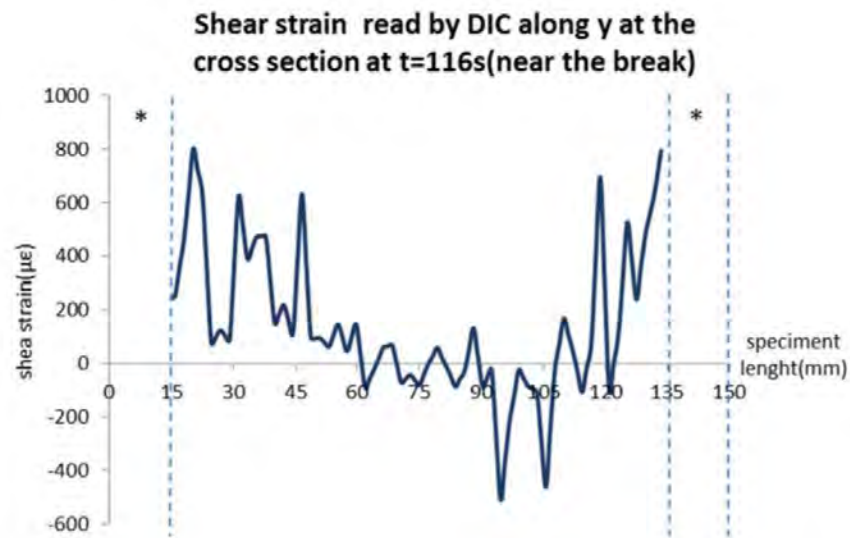


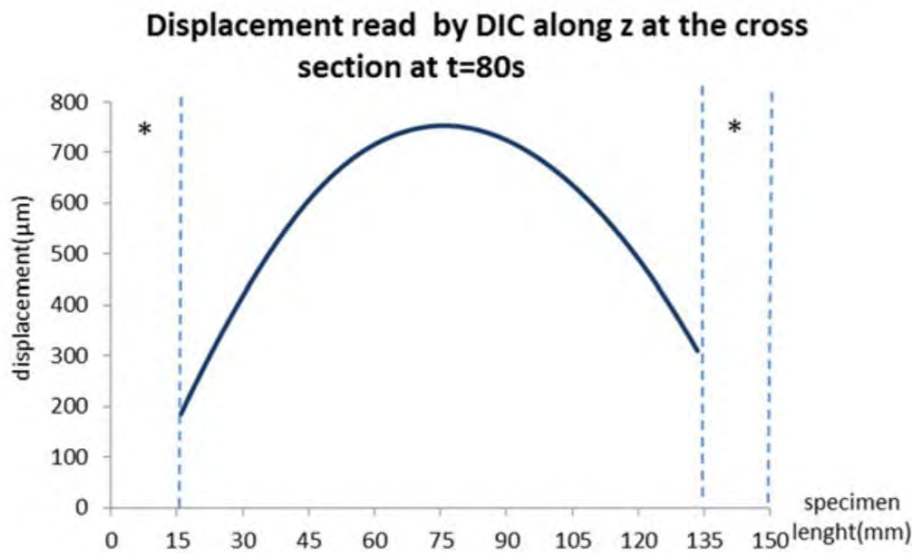
Figura 18. Deformación normal a lo largo de la sección transversal en el segundo 116 [17].

Adicionalmente, se evidencia la curva de esfuerzo cortante a lo largo de la sección de la probeta también en el segundo 116 a lo largo de toda la longitud, el cual indica posibles delaminaciones (**Figura 19**).



*Figura 19. Deformación cortante a lo largo de la sección transversal en el segundo 116 [17].*

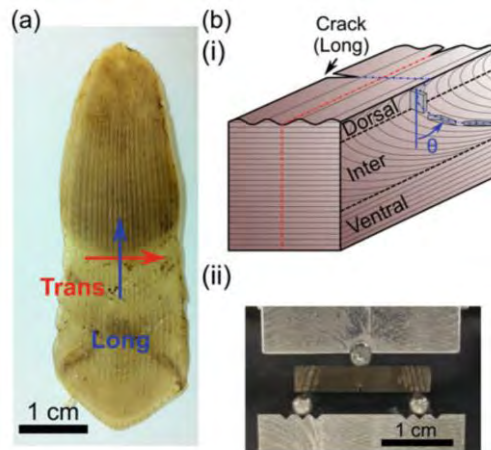
La deformación en el eje perpendicular a la superficie se obtuvo al medir las deformaciones en el denominado eje z (eje saliente de la superficie). Se observó una distribución donde la máxima deformación ocurre exactamente a la mitad de la sección, indicando un futuro pandeo (**Figura 20**).



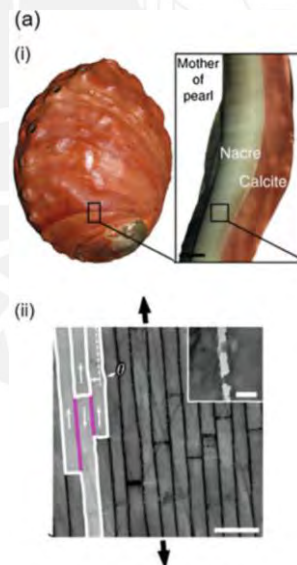
*Figura 20. Deformación normal perpendicular a la superficie de la probeta a lo largo de la sección transversal en el segundo 116 [17].*

**Caso 3:** Identificación de mecanismos de fractura y resistencia a la misma en biomateriales (escamas de pangolines y concha de nácar) usando DIC [18].

- a) Material evaluado: En el presente caso se evaluaron dos biomateriales distintos, escamas de pangolines y concha de nácar. En el ensayo de escamas de pangolines se empleó una probeta de escama de pangolín cortada mediante láser y con una muesca de 1 mm en un borde (**Figura 21**). Por otro lado, al evaluar la concha de nácar se utilizó una probeta de concha nácar cortada mediante un láser y con una muesca de 1 mm, de manera similar a la probeta de escama de pangolín. La **Figura 22** representa una muestra de la estructura y sección transversal de la concha nácar.



*Figura 21. a) escama de pangolín junto con las direcciones principales, b)i) orientación de las láminas de las escamas, b)ii) probeta y set-up del ensayo de flexión [18]*



*Figura 22. a)i) Concha roja (izq.) y sección de la concha (der.), a)ii) micro/nanoestructura de la concha [18].*

- b) Ensayos realizados: Se realizaron para ambos casos ensayos de flexión de tres puntos (TPB, por sus siglas en inglés) y la resistencia a la fractura se evaluó según la norma ASTM E1820.
- c) Procedimiento: Al evaluar la probeta de escama de pangolín se aplicó la técnica DIC para localizar el inicio de la fractura durante un ensayo de flexión de tres puntos con los apoyos ubicados sobre la superficie de la escama en el sentido longitudinal. Se obtuvo un mapa de deformaciones de la superficie mostrando isosuperficies (segmentos de la superficie que se desplazan verticalmente con la misma magnitud), las cuales servían para hallar una curva de desplazamiento y poder localizar el inicio de la fractura.

En el caso de la probeta de concha de nácar, de manera similar se utilizó la técnica DIC para localizar el inicio de la fractura durante un ensayo de flexión de tres puntos. Se ubicaron dos apoyos sobre los extremos de la superficie de la concha en el sentido longitudinal y el otro en el centro de la otra cara, luego se capturaron los campos de deformación en la probeta.

- d) Resultados: Al realizar el ensayo a flexión en la probeta de escama de pangolín se encontraron isosuperficies, estas se muestran en la **Figura 23**, dicha figura también muestra un gráfico de la variable “J” (variable energética) que se usó como medida de la resistencia a la fractura según el método empleado.

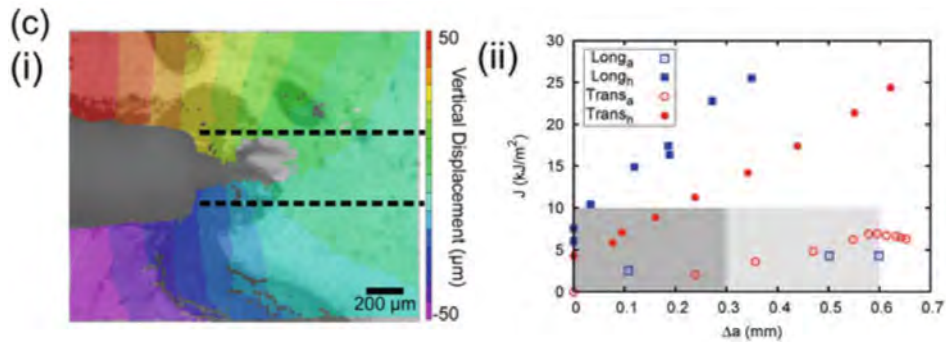


Figura 23. c)i) Isosuperficies en el software DIC mostradas con un color igual. c)ii) Gráfico de la variable “J” vs el desplazamiento longitudinal de la probeta [18]

Por otro lado, la **Figura 24** muestra la posición de la probeta de concha de nácar y aplicación de la fuerza sobre ella. Asimismo, muestra los resultados del análisis DIC en la región de interés, donde se evidencia que a una carga de 53 N se presenta el pico de deformación. Este pico disminuye en la fractura por mecanismos de deslizamiento de los elementos que componen la concha, lo cual provoca que aumente la tenacidad de este material.

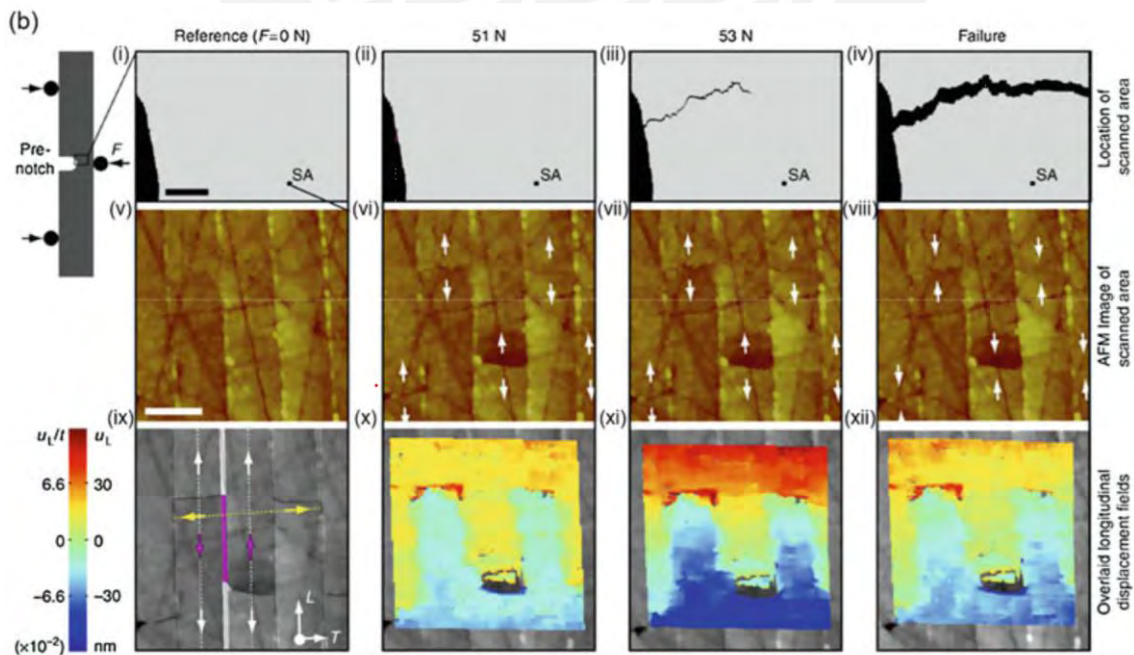


Figura 24. b) Set-up del ensayo a flexión en tres puntos, b)i-iv) imágenes que muestran la posición del área escaneada (SA) en varias instancias. b) v-viii) imágenes en el sentido longitudinal por microscopio de fuerza atómica (AFM) antes de ser procesados según DIC, b) ix-xii) Procesamiento DIC de las imágenes AFM donde se muestra el campo de deformación de la probeta a cada carga [18]



**Caso 4:** Estudio de mecanismos de falla del concreto reforzado con fibras de acero al variar su resistencia a la compresión y la cantidad de acero, bajo un ensayo de tracción indirecta (splitting test) usando correlación de imágenes digitales [19].

- a) **Material evaluado:** Se usó un cemento CEM I 52.5 N, según la norma europea EN 197-1, de una finura, medido a través de su superficie específica, de  $3.520 \text{ cm}^2/\text{g}$  y de densidad  $3.160 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Se utilizó humo de sílice estándar y relleno de piedra caliza como aditivos minerales, los cuales presentan superficies específicas de  $23 \text{ cm}^2/\text{g}$  y  $3.970 \text{ cm}^2/\text{g}$  respectivamente, y como aditivo reductor de agua de gama alta (HRWRA) se empleó una mezcla a base de policarboxilato de gravedad específica 1.05. En esta investigación se utilizaron dos tipos de fibras de acero de punta en forma de gancho (denominadas “tipo 1” y “tipo 2”) con diferentes las relaciones de aspecto y densidades. Estas fibras presentaron una gravedad específica de 7.8 y fueron adheridas unas a otras con pegamento soluble al agua. Se usaron dos dosajes de fibras: 0.5% y 1% por volumen de concreto; además, se empleó una probeta sin fibras como referencia. Para los ensayos, se usaron 3 tipos de concreto: concreto de fluidez ordinaria (OC), concreto autocompactante (SCC) y un concreto de alta resistencia plástica (HSC); para cada una de estas tres muestras se usaron seis probetas. Las probetas de hormigón cilíndricas tenían un diámetro de 110 mm y una altura de 220 mm, fueron desmoldadas al pasar 24 horas y curadas en un cuarto a  $23^\circ\text{C}$  y 95% de humedad relativa.
- b) **Ensayos realizados:** Se realizó el ensayo de tracción indirecta para probetas de concreto según la norma ASTM C496, además se realizaron ensayos de compresión complementarios según EN 12390-3.
- c) **Equipamiento:** Se empleó una máquina de prueba universal servohidráulica con dos bandas de 9 mm de ancho y 4 mm de espesor. Se utilizaron transductores de desplazamiento variable lineal (LVDTs) para medir desplazamientos transversales. Para el DIC se usó un equipo GOM, el cual constaba de dos cámaras con resolución de 4 megapíxeles ( $2048 \times 2048$  píxeles) y tasa de fotogramas máxima de 7 Hz; además, se utilizaron dos lentes de distancia focal de 50 mm. Las imágenes se pasaron a una tarjeta de adquisición de datos para almacenar imágenes en el disco duro de una computadora de alto rendimiento.
- d) **Parámetros de ensayo:** Se usó una velocidad de ensayo de 0.01 mm/s. En el equipo DIC se usó una frecuencia de adquisición de imágenes de 0.2 s y las cámaras fueron colocadas a 535 mm de distancia de la muestra y separadas 400 mm entre sí.
- e) **Procedimiento:** Previo a realizar las pruebas, se pulieron las caras de la probeta. El desplazamiento transversal de la muestra (es decir, el desplazamiento perpendicular al plano de carga) se midió usando transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT) montados en puntos de referencia que estaban pegados al segundo lado de la muestra (**Figura 25**).

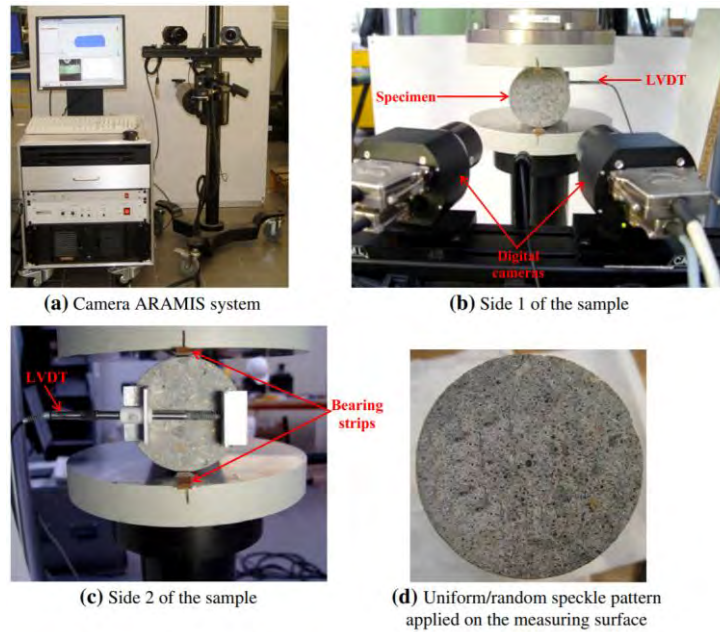


Figura 25. a) Sistema GOM ARAMIS, b) Lado "1" de la probeta, c) Lado "2" de la probeta, d) Patrón empleado en la probeta para usar DIC [19]

Luego, se aplicó un patrón aleatorio en todo el lado de la probeta y se procedió a proporcionar una fuente de luz externa, además se calibró el equipo usando el objeto de calibración adecuado según el volumen de la probeta, acto seguido se procedió con el ensayo. Se midieron los desplazamientos axiales utilizando tres LVDT dispuestos en una disposición circular horizontal para obtener la medición de la resistencia a la compresión. Además, se utilizó un sistema electrónico de adquisición de datos para registrar los desplazamientos y las cargas correspondientes.

- f) Resultados: Al medir la resistencia a la compresión en un ensayo de compresión de concreto (EN 12390-3) se hallaron curvas de tensión y deformación para las diferentes configuraciones de probetas. Se observó que la presencia de fibras de acero disminuye en un porcentaje entre 7 y 10% la resistencia a la compresión del concreto (**Figura 26**). Sin embargo, una vez ocurrida la fractura ayudan a conservar la resistencia a la compresión, lo cual se evidencia cuando la pendiente disminuye de manera más suave después del pico de fractura en los casos de las probetas de concreto con fibras.

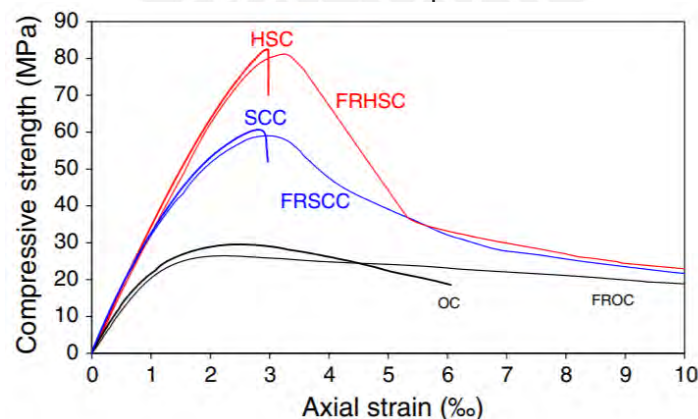
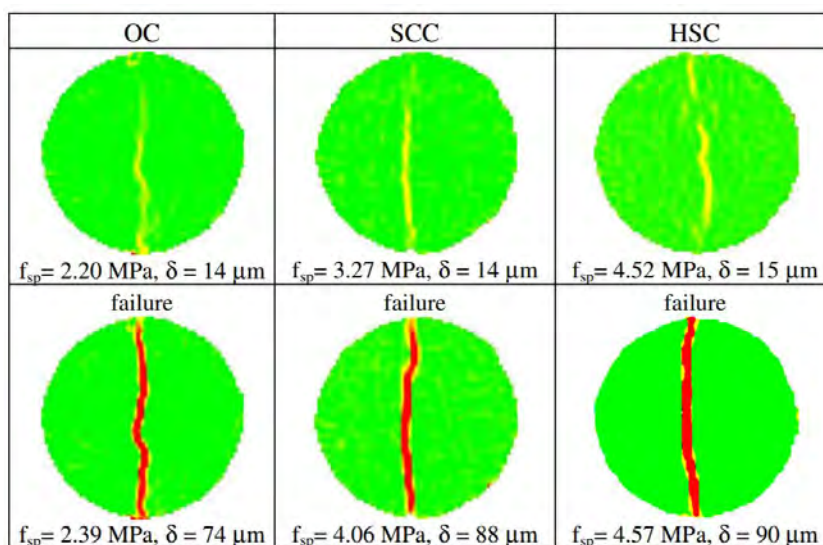


Figura 26. Curva de resistencia a la compresión vs. deformación axial. El prefijo FR significa que es un concreto con fibras de acero añadidas. OC, SCC y HSC significan concreto de fluidez ordinaria, concreto autocompactante y concreto de alta resistencia plástica respectivamente [19].

Por otro lado, se realizaron los ensayos de tracción indirecta (aplicando la norma ASTM C496), donde se halló que la resistencia a la tracción en probetas con fibras de acero con concreto de alta resistencia a la compresión era mayor a las otras probetas de otras configuraciones. Los incrementos de la resistencia última a la tracción variaron entre 15 a 40% para una fracción de fibras de 0.5% al volumen y de 40 a 59%, para unas de 1% en relación al volumen. Asimismo, las fibras de mayor relación longitud/diámetro mostraron una resistencia a la tracción superior en 10% a las probetas de menor longitud relativa.

Finalmente, durante el ensayo de tracción indirecta (ASTM C496), se realizó una inspección de la morfología de las fisuras usando DIC. Se evidenció que para las probetas sin refuerzo de fibras de acero, la fractura empieza en el centro de la probeta y se propaga hacia las zonas de aplicación de carga (**Figura 27**).



*Figura 31. Morfología de las grietas para tres tipos de concreto sin fibras. Se muestran el esfuerzo de compresión y desplazamiento transversal medidos. OC, SCC y HSC significan concreto de fluidez ordinaria, concreto autocompactante y concreto de alta resistencia plástica respectivamente [19].*

Por otro lado, en las probetas con refuerzo de fibras de carbono, las grietas suelen aparecer en el centro de la probeta y propagarse hacia las zonas de aplicación de fuerza. Mientras esta grieta principal aumenta suelen aparecer nuevas grietas con origen en las zonas de aplicación de la fuerza que son de menor tamaño y son llamadas grietas secundarias. Al fallar la probeta, esta se divide en dos partes. La evolución de este proceso de muestra en la **Figura 28**.

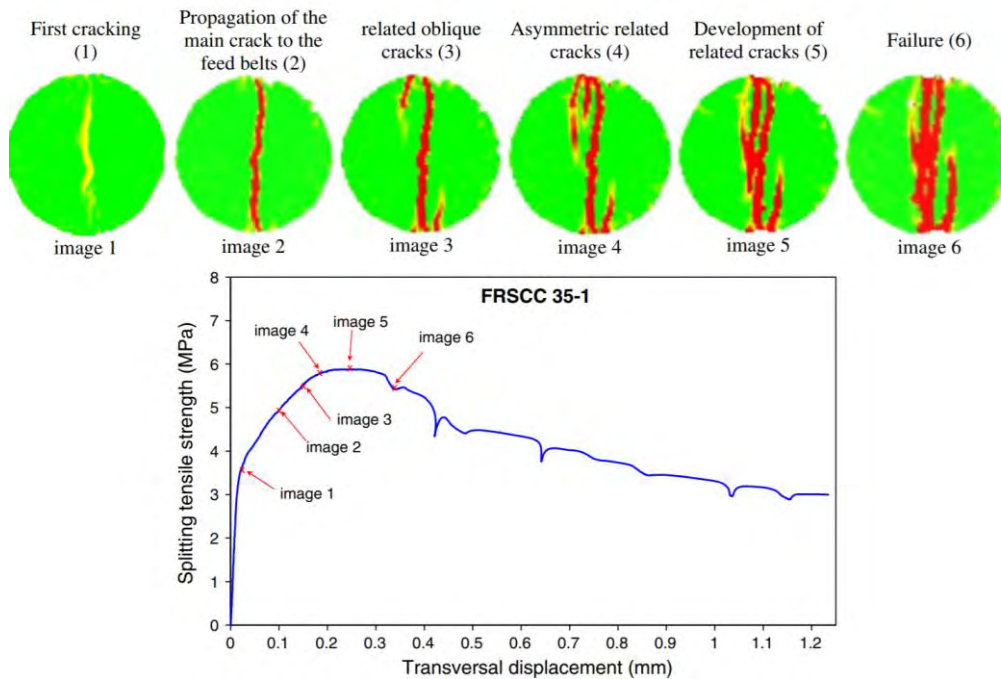


Figura 28. Morfología de las grietas para tres tipos de concreto con fibras. FRSCC 35-1 significa concreto autocompactante reforzado con fibras con fibras de 35 mm y 1% en relación al volumen de concreto [19].

**Caso 5:** Caracterización y evaluación de propiedades mecánicas de una resina epóxica EPON E 863 mediante ensayos a tracción, flexión y compresión, al variar la velocidad de deformación y la geometría de las probetas, usando correlación de imágenes digitales [20].

- a) Material evaluado: En este experimento se usó resina epóxica Epon E 863 con endurecedor EPI-CURE 3290; la proporción de peso fue de 100/27 para todos los ensayos a realizar. Además, en las pruebas de tracción se usaron dos tipos de geometrías con una sección reducida en la parte central (denominadas de tipo 1 y tipo 2). Adicionalmente, se utilizaron muestras cúbicas de 4 mm de lado (de tipo C\_1), prismáticas de cuatro lados de 3.5 mm de lado (de tipo C\_2) y 8 mm de largo, y cilíndricas de 10 mm de largo y 4 mm de diámetro (de tipo C\_2) en pruebas de compresión. Asimismo, se emplearon vigas con muescas o ranuras, unas con un largo de 60 mm, una altura de 10 mm y un ancho de 4 mm (de tipo B\_1 cuando tiene una muesca y B\_1 m cuando existe una ranura) y otras con un largo de 90 mm, una altura de 12 mm y un ancho de 4 mm (de tipo B\_2 cuando tiene una muesca y B\_2 m cuando existe una ranura), que se probaron en sus puntos medios en ensayos de flexión. A continuación, la **Figura 29** presenta las probetas antes mencionadas.



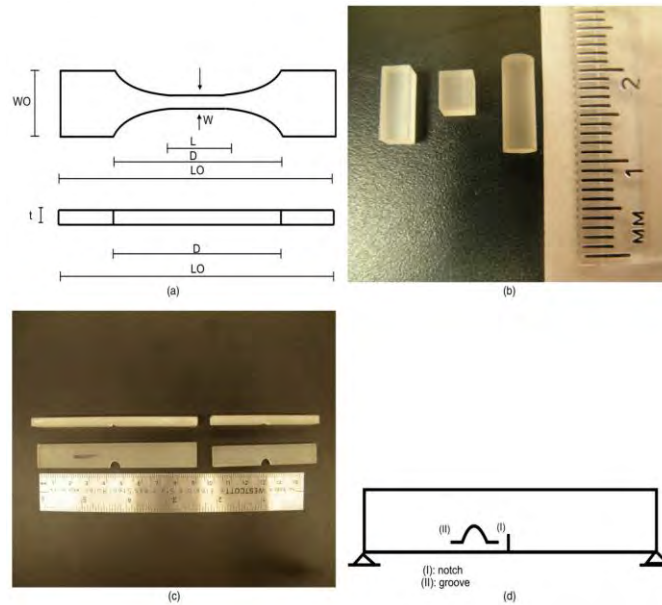


Figura 29. a) Probetas para ensayos axiales, b) Probetas para ensayos a compresión, c) y d) Probetas para ensayos a flexión [20].

b) Ensayos realizados: Los ensayos realizados se presentan con sus respectivas normas:

- Ensayo de tracción (ASTM D 638 sección 6.1 año 2010)
- Ensayo de compresión (ASTM D 695 sección 6.2 y 6.7 año 2010)
- Ensayo de flexión (ASTM D 790 sección 7 año 2003)

c) Equipamiento: Se utilizó una celda de carga de interfaz modelo SM-1000 para medir la carga axial, además para calcular la deformación axial se usó un extensómetro MTS modelo 634-12E-24, medidores de deformación modelo SGD-3/120-RYB23 y un equipo GOM ARAMIS 4M.

d) Procedimiento: En el ensayo de tracción se aplicó un patrón de manchas negras sobre una matriz de pintura negra en la superficie de la probeta para poder emplear la técnica DIC. Se usó extensómetros y DIC para medir la deformación en las probetas tipo 1 y galgas extensiométricas en las tipo 2, para comparar sus curvas de tensión/deformación con las curvas obtenidas del sistema DIC. Las velocidades de ensayo a usarse para las probetas de tipo 1 son de 493 y 59  $\mu\text{str/s}$ , y de 833  $\mu\text{str/s}$  en las probetas tipo 2. A continuación la **Figura 30** presenta el set-up de los equipos.



Figura 30. Configuración de prueba: cámaras de medición óptica, extensómetro MTS y sistemas de controlador de computadora [20].

De manera similar, en el ensayo de compresión se procedió a ensayar probetas de forma cúbica, prismática y cilíndrica a diferentes velocidades. Se utilizó el mismo equipamiento de ensayo que para el ensayo a tracción.

Por otro lado, en el caso del ensayo de flexión se usó la configuración de ensayo de flexión de 3 puntos para las probetas, con las muescas o ranuras en el extremo opuesto de aplicación de la fuerza. Además, se usaron tasas de deformación entre 493 y 59  $\mu\text{str/s}$ , que se calcularon asumiendo que la velocidad de deflexión es igual a la tasa de aplicación de la carga.

- e) Resultados: Con respecto a los resultados del ensayo de tracción, al medir las probetas tipo 1 usando DIC se obtuvo la curva esfuerzo/deformación unitaria para distintas probetas a diferentes velocidades de deformación (Figura 31), se evidencian efectos de endurecimiento por deformación antes de la fractura, y a la vez respuestas de ablandamiento por deformación posterior al pico de esfuerzo inicial y de fenómenos de flujo plástico.

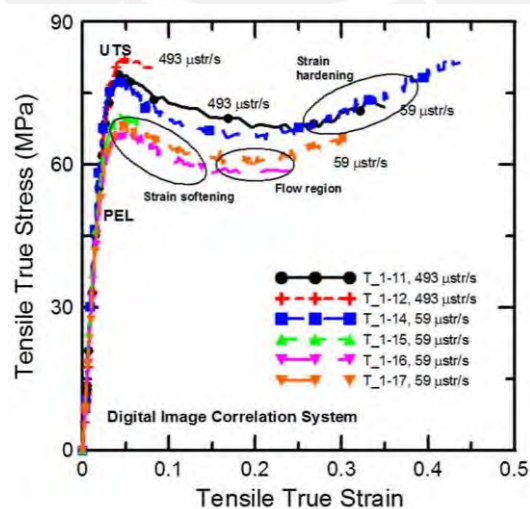


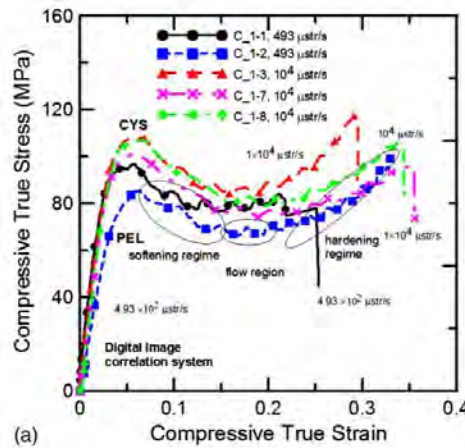
Figura 31. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para tasas de deformación de 493 y 59  $\mu\text{str/s}$  en múltiples probetas un ensayo de tracción [20]

Además, como se mencionó anteriormente, se usó la técnica DIC para conseguir las propiedades mecánicas a distintas velocidades, debido a que esta técnica no se afecta por efectos de elongación local como pasa con las probetas de tipo 2, en las que se midió la elongación por medio de galgas extensiométricas. En la **Tabla 2** se resumen las propiedades medidas para las dos tasas de deformación empleadas ( $\dot{\epsilon}$ ).

$\dot{\epsilon}$ ( $\mu\text{str/s}$ )	$E$ (MPa)	$\sigma_{\text{UTS}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{UTS}}$ (%)	$\sigma_{\text{PEL}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{PEL}}$ (%)	$\epsilon_F$ (%)
59	2,969	72.0	4.13	46.7	1.6	26.8
493	3,081	81.0	4.1	49.5	1.6	21.4

*Tabla 2. Propiedades mecánicas de las probetas de tipo 1.  $\dot{\epsilon}$  es la tasa de deformación,  $E$  es el módulo de elasticidad,  $\sigma_{\text{UTS}}$  es el esfuerzo último a la tracción,  $\epsilon_{\text{UTS}}$  es la deformación para la que ocurre el esfuerzo último a la tracción,  $\sigma_{\text{PEL}}$  es el esfuerzo en el límite de proporcionalidad,  $\epsilon_{\text{PEL}}$  es la deformación en el límite de proporcionalidad y  $\epsilon_F$  es la deformación cuando ocurre la falla [20].*

Con respecto a los resultados del ensayo de compresión, también se hallaron curvas esfuerzo/deformación unitaria con comportamientos similares a los hallados en el ensayo de tracción; sin embargo, existieron diferencias de acuerdo a la forma de las probetas. En las probetas de forma cúbica se observó un abarillamiento, por lo que se produjo un estado de esfuerzos triaxial. En cambio, en las probetas prismáticas y cilíndricas no ocurría este abarillamiento y entonces el estado de esfuerzos medido era uniaxial. A continuación la **Figura 32**, **Figura 33** y **Figura 34** presentan las curvas para cada tipo de probeta.



*Figura 32. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para velocidades de deformación de 493 y  $10^4$   $\mu\text{str/s}$  en probetas cúbicas [20]*

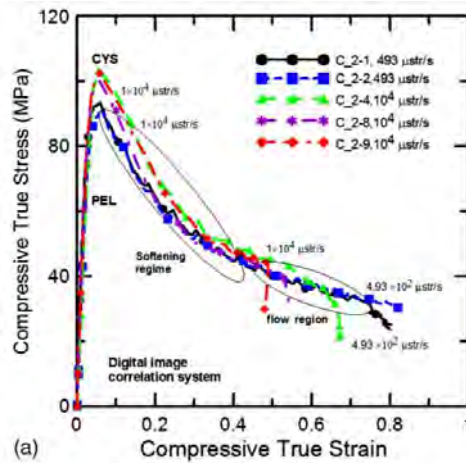


Figura 33. Diagrama esfuerzo/deformación unitaria para tasas de deformación de 493 y  $10^4$   $\mu\text{str/s}$  en probetas prismáticas [20]

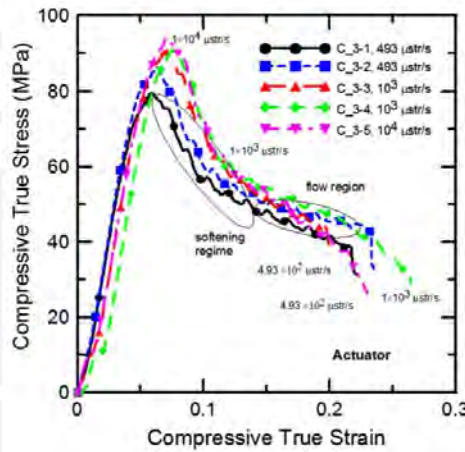


Figura 34. Diagrama esfuerzo/deformación unitaria para tasas de deformación de 493 y  $10^4$   $\mu\text{str/s}$  en probetas cilíndricas [20].

Finalmente, con respecto a los resultados del ensayo de flexión, se obtuvieron curvas de esfuerzo/deflexión para cada tipo de probeta (**Figura 35**), se observa que inicialmente la carga aumenta con la deflexión hasta llegar a un punto de inflexión denominado LOP. Luego, se sigue incrementando la carga con menor pendiente hasta llegar al punto máximo conocido como MOR, seguido de un ablandamiento del material y fractura del mismo.

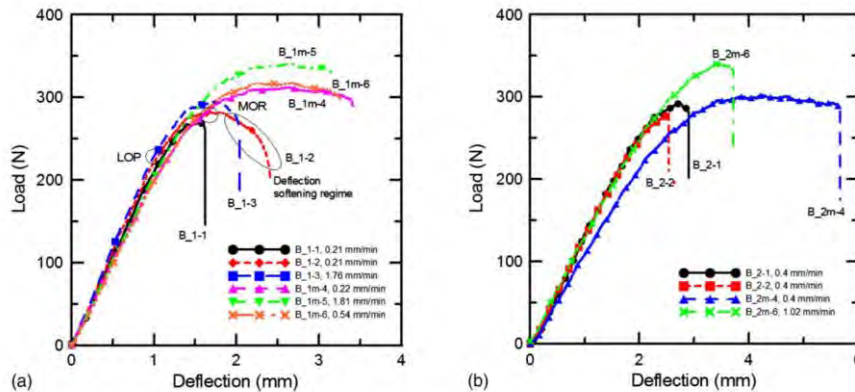


Figura 35. Curvas de deflexión de carga para a) tipos de muestra B\_1 y B\_1 m, b) tipos de muestra B\_2 y B\_2 m [20].



Es importante mencionar que en términos de propiedades mecánicas se encuentra un mayor esfuerzo último (MOR) en las probetas sometidas a mayor tasa de deformación. Además, se halló que una mayor tasa de deformación genera un mayor endurecimiento del material, lo que es especialmente útil en las probetas con muescas o ranuras, incrementando la deflexión que pueden alcanzar antes de la fractura.

**Caso 6:** Estudio de diferentes características como distribuciones de esfuerzo cortante, estados de deformación, variaciones por tasa de deformación y punto de inicio de fractura de materiales de polipropileno cuando son sujetos a ensayos de corte, analizados con correlación de imágenes digitales y simulaciones numéricas [21].

- a) Material evaluado: En el presente caso se trabajó con tres materiales de polipropileno.
- Homopolímero  $\alpha$ -nucleado (PPH)
  - Polipropileno modificado por elastómero con 20% de relleno de mineral (PP20)
  - Polipropileno modificado por elastómero con 40% de relleno de mineral (PP40)

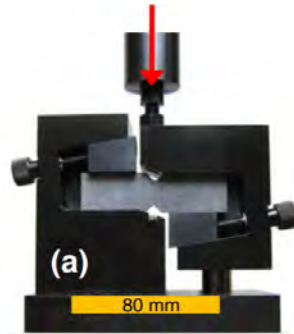
Estos dos últimos son grados de polipropileno moldeado por inyección. Algunas de las propiedades más resaltantes se muestran en la **Tabla 3**.

	PP40	PP20	PPH
Melt flow rate (ISO 1133) (230°C, 2.16 kg) [dg/min]	2	13	—
Density (ISO 1183) [kg/m <sup>3</sup> ]	1222	1050	915
Tensile modulus (ISO 527) (2 mm/min) [GPa]	3.8	1.4	1.7
Tensile stress at yield (ISO 527) (50 mm/min) [MPa]	31	16	33
Ratio of yield stress to modulus (both in tension)	8.2	11.4	19.4
Charpy impact strength, notched (ISO 179/1eA) [kJ/m <sup>2</sup> ]	5	58	9

*Tabla 3. Propiedades seleccionadas de los materiales del estudio realizado (propiedades mecánicas a 23 °C). El esfuerzo de fluencia es el esfuerzo nominal [21].*

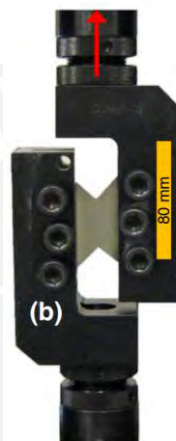
Las muestras se maquinaron de acuerdo a los estándares de los ensayos a realizarse desde espesores de material base de 3.9 mm en los casos de PP20 y PP40, y de 4 mm en el caso de PPH. El plano de paso entre las entallas se ubicó en posición paralela al flujo de fuerzas en el ensayo.

- b) Ensayos realizados: Ensayo de corte con método losipescu o de probeta con muesca en V (ASTM D5379) y método de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078), ambos ensayos fueron dirigidos a materiales compuestos.
- c) Equipamiento: Se empleó una celda de carga de 5 kN. El registro de la fuerza fue llevado a cabo por una DAQCard 6062E de National Instruments en sincronización con el sistema de correlación de imágenes digitales Vic3D de Limess/Correlated Solutions. El sistema DIC tenía dos cámaras montadas separadas con un ángulo igual una de otra con resolución de 2452x2052 píxeles, una distancia focal de 75 mm y lentes de apertura f/2.8.
- d) Parámetros de ensayo: Se fijaron 12 fotogramas por segundo en la mayoría de experimentos. Los datos se procesaron con un tamaño de faceta de 21 píxeles y un espaciado de cuadrícula de 5 píxeles.
- e) Procedimiento: Para el ensayo ASTM D5379 se colocó a la probeta como se indica en la **Figura 36**.



*Figura 36. Probeta montada en el ensayo ASTM D5379 o Ensayo losipescu. La flecha indica la dirección del desplazamiento que genera el corte en la probeta [21]*

Para el ensayo ASTM D7078 se ubicó a la probeta como se indica en la **Figura 37**.



*Figura 37. Probeta montada en el ensayo ASTM D7078. La flecha indica la dirección del desplazamiento que genera el corte en la probeta [21].*

- f) Resultados: Usando el método losipescu (ASTM D5379) se obtuvieron los resultados mostrados en la **Figura 38** para cada material probado al usar DIC. En la parte superior de la **Figura 38** se observan los resultados para deformaciones unitarias pequeñas, se pueden notar los distintos campos de deformación para los tres materiales empleados. En la parte inferior, se puede observar lo mismo para deformaciones unitarias mayores, en este último caso se puede observar la fractura del PP40 (indicado con círculos blancos).

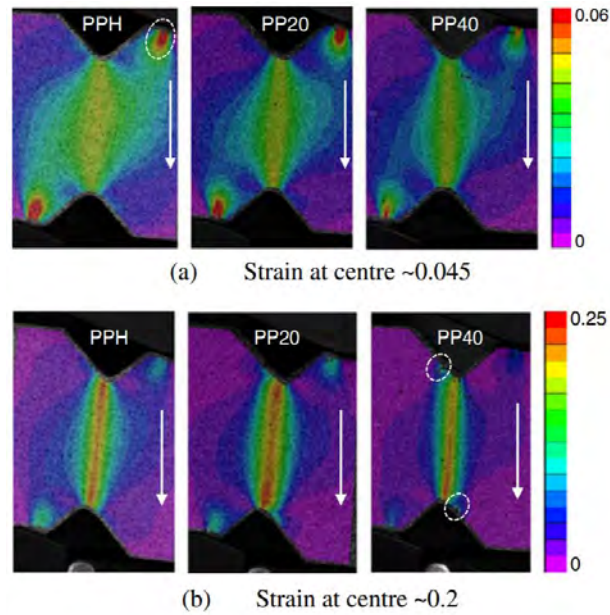


Figura 38. Distribuciones de corte en los tres materiales ensayados, usando el método de losipescu (ASTM D5379) para dos velocidades de deformación [21].

De la misma manera, al realizar los ensayos de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078) en los mismos materiales, se obtuvieron los resultados presentes en la **Figura 39**. En la parte superior de la **Figura 39** se evidencian los resultados para deformaciones unitarias pequeñas y en la parte inferior se puede observar lo mismo para deformaciones unitarias mayores. Se presenta una mayor gradiente de deformaciones verticales entre el centro del espécimen con la raíz de la entalla, como se evidencia por los colores del software.

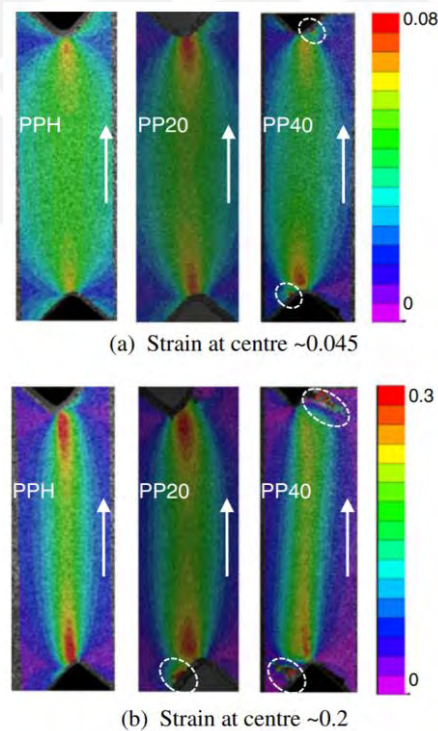
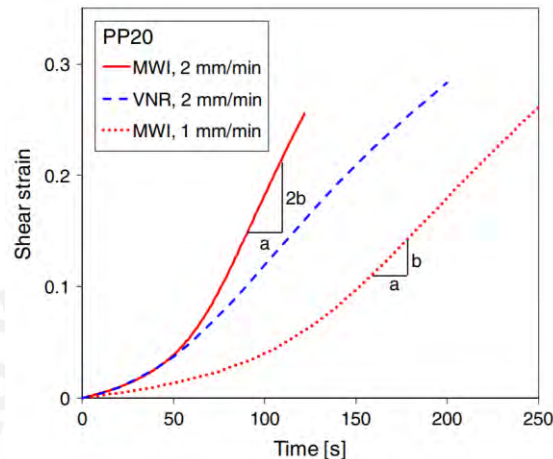


Figura 39. Distribuciones de corte en los tres materiales ensayados, usando el método de corte en riel con muesca en V (ASTM D7078) para dos velocidades de deformación [21].

Es importante mencionar que, en términos del estado de deformación, se observa que el material PPH en el ensayo de losipescu (ASTM D5379) es predecible mediante un modelo teórico hasta una deformación unitaria de 0.2. Para todos los materiales ensayados según el método de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078), la curva teórica de corte se aleja más del ensayo. Por otro lado, se evidenció que la tasa de deformación a corte varía en el tiempo de diferente manera para cada probeta y ensayo. El ensayo de losipescu (ASTM D5379) presentó una mayor tasa de deformación, que fue aún más evidenciada una vez que la probeta pasó el punto de fluencia. Para poder tener resultados similares con el método de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078) se usó una velocidad de ensayo tal que la pendiente de la deformación en el tiempo sea la misma (**Figura 40**).



*Figura 40. Esfuerzo cortante en el centro de la probeta (usando DIC) vs. tiempo. Datos para PP20 con los dos tipos de ensayo y dos diferentes velocidades de ensayo, VNR es el método de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078) y MWI es el ensayo de losipescu (ASTM D5379) [21].*

**Caso 7:** Caracterización del material IM7-8552 carbono-epóxica unidireccional en compresión transversal y corte en el mismo plano usando DIC [22].

- a) Material evaluado: En este caso se utilizó “carbon-epoxy prepreg system HexPly® IM7-8552”. Durante el ciclo de curado se fabricaron placas unidireccionales de 32 capas en una prensa caliente SATIM. Se cortaron especímenes con orientaciones de fibras de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° y 75° grados, asimismo como especímenes transversales (90°). Las dimensiones nominales fueron de 20mmx10mmx4mm y estaban de acuerdo al estándar ASTM D3410. Por esta razón, solo se necesitaron mediciones de un lado (usando DIC) para dar por válido el ensayo. Las superficies de carga tenían una tolerancia al paralelismo de 0.02mm y estaban en buen estado.
- b) Ensayos realizados: Se realizaron dos tipos de ensayo.
  - Ensayo cuasiestático a compresión.
  - Ensayo dinámico, este último usando una barra presurizada Split-Hopkinson.
- c) Equipamiento: En el caso de los ensayos cuasiestáticos, se empleó un marco de carga estándar INSTRON 4208. Además, se usaron carburos pulidos de tungsteno para soportar las altas cargas y evitar que se dañen las superficies de carga. La fricción entre estos carburos y el espécimen se minimizó usando una capa pequeña de disulfuro de molibdeno. El equipo DIC usado fue un GOM ARAMIS en la versión 6.02. La cámara empleada fue una Baumer Optronic FWX20 de 8 bits con resolución 1624x1236 pixeles y se acompañó de una Nikon AF Micro-Nikkor 200mm f/4D de lentes IF-ED y un tubo de extensión de 50 mm. Dos luces halógenas se usaron para la iluminación de las cámaras. A continuación la **Figura 41** muestra el *set-up* del ensayo cuasiestático de compresión.



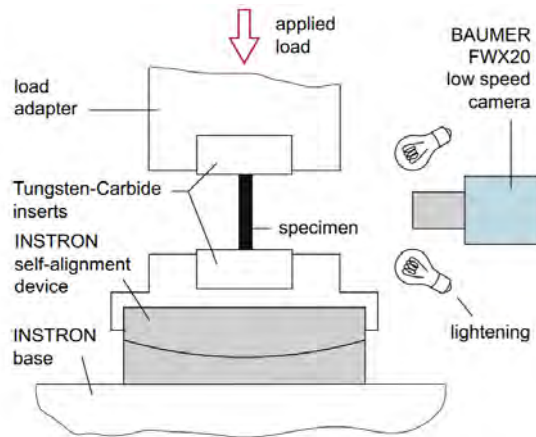


Figura 41. Setup del ensayo cuasiestático de compresión [22].

Por otro lado, para realizar los ensayos dinámicos a altas tasas de deformación se usa una barra de presión split-Hopkinson, usando una barra golpeadora (“striker-bar”) de 16 mm de diámetro y barras de transmisión de 0.6, 2.6 y 1.6 metros. Se usaron galgas extensiométricas en la barra de transmisión, posicionados a 0.3 metros de la interfaz del espécimen. Además, se empleó un transductor amplificador de alta velocidad FLYDE FE-H379-TA. Para captar las señales de las galgas extensiométricas se empleó el osciloscopio TEKTRONIX TDS3014 B. Adicionalmente, se utilizó una cámara de alta velocidad PHOTROM SA5. Finalmente, se usaron dos unidades de DEDOLIGHT 400D para iluminar al espécimen y para evitar zonas reflectivas se empleó cinta adhesiva color negro mate alrededor del espécimen. El set-up del experimento se puede observar en la **Figura 42**.

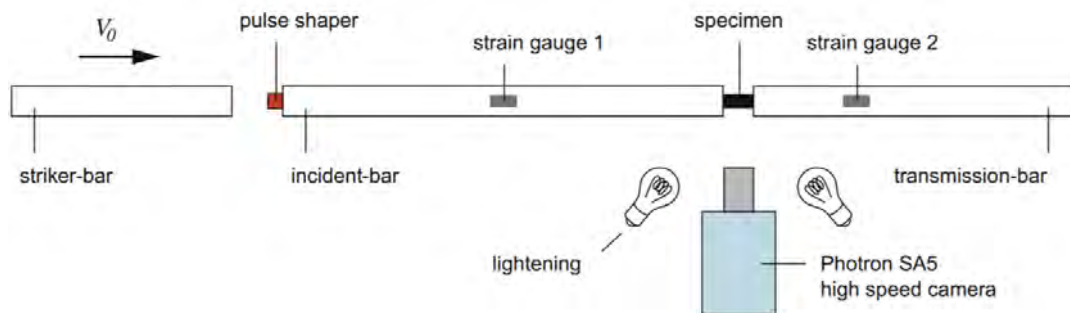


Figura 42. Setup del ensayo dinámico usando la barra de presión [22].

- d) Parámetros de ensayo: En el caso del ensayo cuasiestático, la velocidad del ensayo fue de 0.5 mm/min. La cámara se posicionó a 1 metro de la superficie del espécimen. Dos luces halógenas se usaron para la iluminación de las cámaras. La tasa de fotogramas empleada fue de 1 fps con una velocidad de obturación de 40 ms y se usó una apertura de  $f/11$ .

Por otro lado, en el caso del ensayo dinámico, se emplearon velocidades de deformación entre  $90 \text{ s}^{-1}$  y  $350 \text{ s}^{-1}$ . Además, se usó una ganancia en el transductor de 1000 veces para amplificar la señal de las galgas. El lente se posicionó a 0.5 m de la superficie del espécimen. Al realizar el ensayo que determina las deformaciones en el plano de la cara del espécimen se emplearon tasas de fotogramas de 100 000 fps con una resolución de 320x192 píxeles y una velocidad de obturación de 9.8  $\mu\text{s}$ . Luego se llevaron a cabo pruebas adicionales para la compresión fuera de eje a  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$  y para los tipos de muestras para ensayos de compresión transversal para medir el ángulo del plano de fractura. Para estas últimas pruebas, estas muestras fueron filmadas desde

el costado. Estas últimas pruebas usaron la misma cámara a una resolución de 320x72 píxeles y a una tasa de fotogramas de 232500 fps y una velocidad de obturación de 4.3  $\mu$ s. Para todos los ensayos dinámicos realizados la apertura fue  $f/2.8$ .

- e) Procedimiento: En el caso de ensayo cuasiestático se realizaron tres pruebas para cada ángulo de orientación de las fibras; sin embargo, se desarrollaron más ensayos para el ángulo de 15° debido a que se observaron modos diferentes de fallo. Por otro lado, al realizar el ensayo dinámico, se realizaron 5 pruebas para el caso de probetas con orientación de fibras de 15° y 4 para las de 30°, además para las probetas de 45°, 60°, 75° y 90° se desarrollaron tres ensayos por ángulo.
- f) Resultados: La **Figura 43** muestra la comparación de resultados para los ensayos cuasiestáticos y dinámicos realizados para diferentes ángulos de orientación de las fibras. En todos los casos se incrementa el módulo de elasticidad. No obstante, se observa que para probetas con ángulos de 30°, 45° y 60° conforme aumenta la tasa de deformación, disminuye la deformación última axial. Sin embargo, no se observa ninguna variación por tasa de deformación en los otros ángulos ensayados.

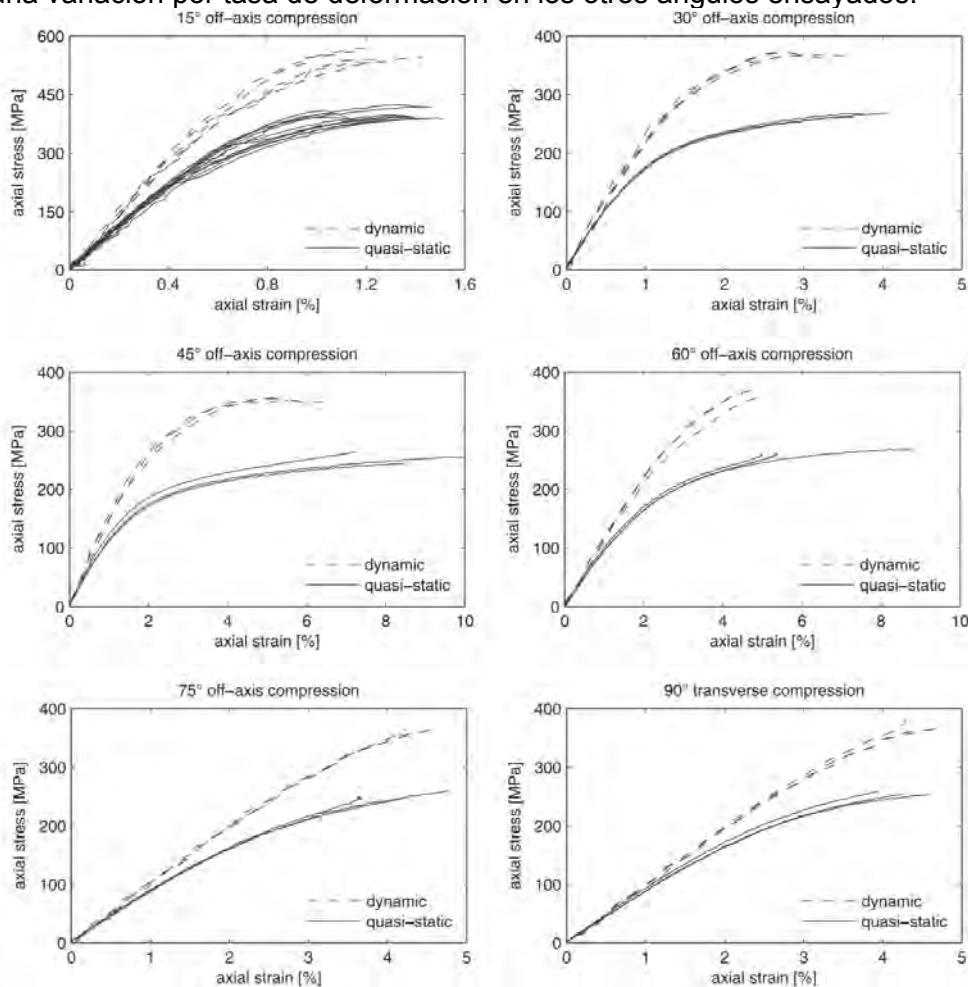


Figura 43. Respuestas cuasi-estáticas y dinámicas de deformación-esfuerzo axial de las pruebas de compresión transversal y fuera del eje [22].

Adicionalmente, la **Tabla 4** resume las propiedades de corte para ensayos dinámicos y estáticos.

Quasi-static and dynamic in-plane shear properties.

	Modulus $G_{12}$ [MPa]	Yield strength $S_y^L$ [MPa]	Ultimate strength $S^L$ [MPa]
Static	5068	29.7	99.9
Dynamic	6345	55.7	141.8

Tabla 4. Propiedades de corte en el plano cuasiestático y dinámico [22].

**Caso 8:** Correlación de imágenes digitales en análisis de rigidez en zonas locales de juntas soldadas [23].

- a) Material evaluado: En este caso se evaluó un material compuesto comprendido de una unión soldada con metal base S235JRG2 y de material de aporte se usó VAC 60. Las dimensiones del espécimen fueron de 182x20.2x9.2. La **Tabla 5** muestra sus propiedades mecánicas.

Nominal thickness (mm)	up to 100 mm
$R_e$ (MPa)	215
$R_m$ (MPa)	340
A-longitudinal %	24
A-transverse %	17

Tabla 5. Propiedades mecánicas del metal base.  $R_e$  significa esfuerzo a la fleucnia,  $R_m$  es esfuerzo último a la tensión [23].

- b) Ensayos realizados: Se realizó un ensayo de tracción simple.
- c) Equipamiento: Se usó un equipo de correlación de imágenes digitales GOM Aramis 2M y una máquina de ensayos universal INSTRON. Basado en el volumen de calibración del espécimen de 100mmx100mmx75mm, se empleó el volumen de calibración CP20 90x72. La pintura empleada fue una Kenda Color Acril- 207ico.
- d) Procedimiento: El equipo GOM se calibró en 13 pasos, con una desviación de calibración de 0.038 píxeles. La **Figura 44** describe el *set-up* del experimento.

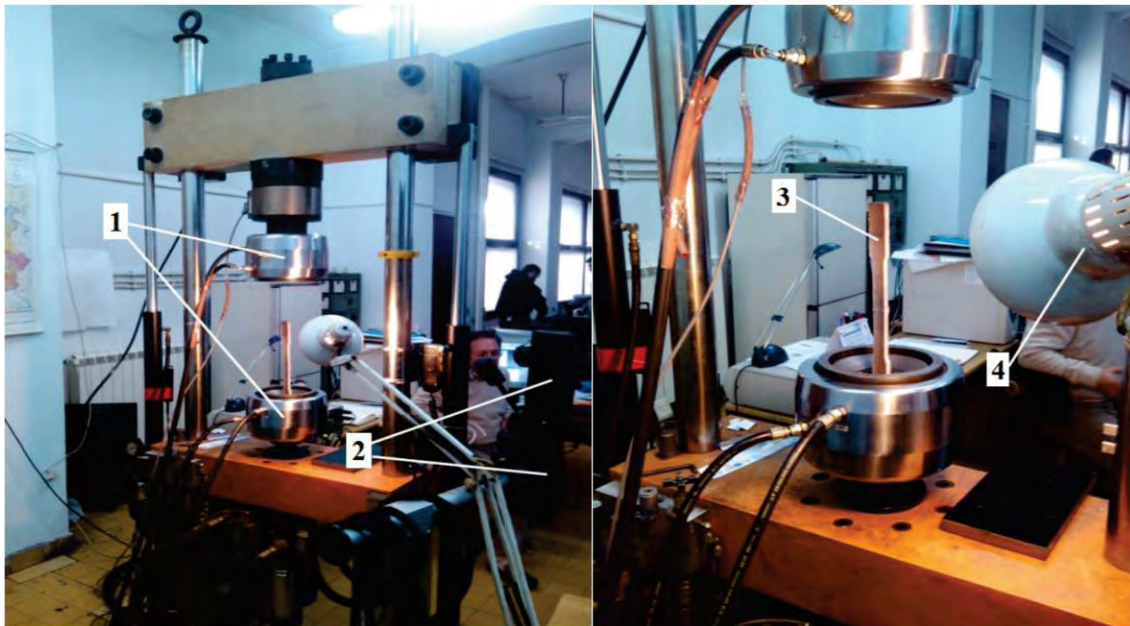


Figura 44. Setup experimental. (1) Mordazas. (2) Cámaras (3) Especimen. (4) Lámpara [23].

- e) Resultados: Se obtuvo la curva esfuerzo deformación de la probeta (**Figura 45**). El esfuerzo de fluencia fue 260 MPa para una deformación unitaria de 0.67% y el esfuerzo último a la tracción fue de 390 MPa para una deformación de 39%.

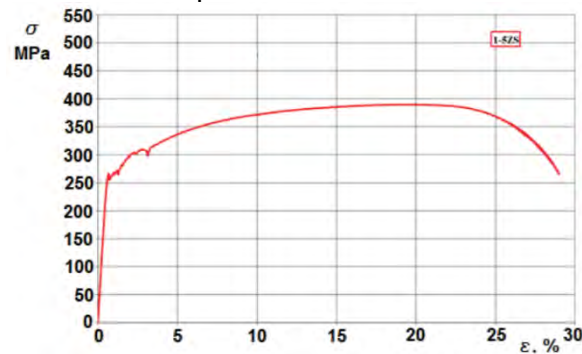


Figura 45. Diagrama esfuerzo/deformación unitaria de la probeta [23]

Asimismo, se muestran las deformaciones locales deseadas que se muestran gracias al software incluido en el equipo GOM ARAMIS. En la **Figura 46** se observa la deformación en la raíz de la soldadura asimismo como en el metal base y la zona afectada por calor (ZAC). Se muestra que la deformación mayor se llevó a cabo en el material base y en la raíz, con valores de 0.6 y 0.7%.

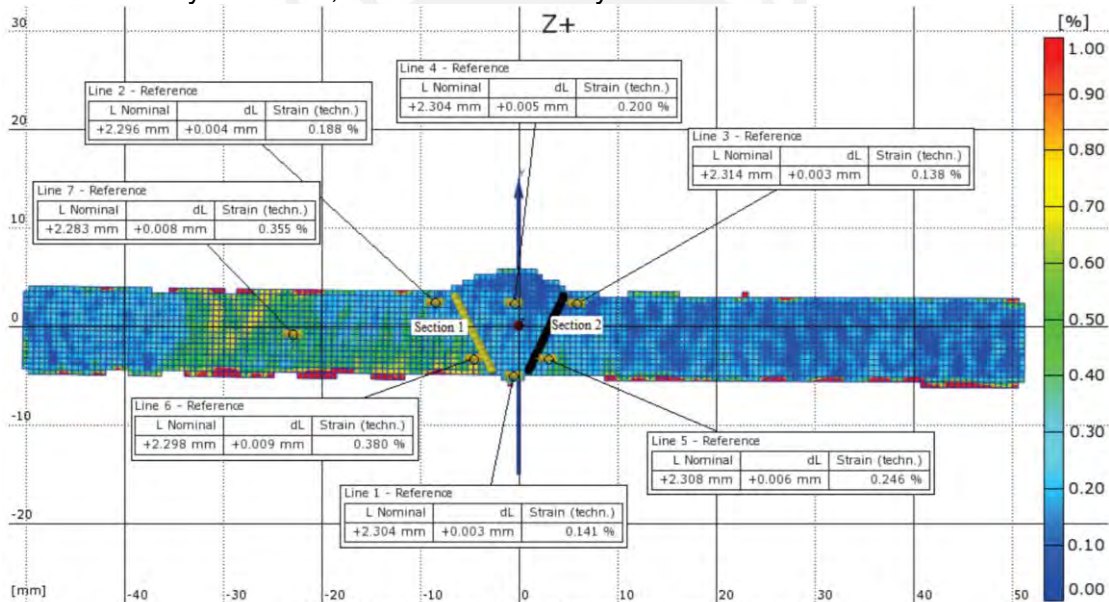


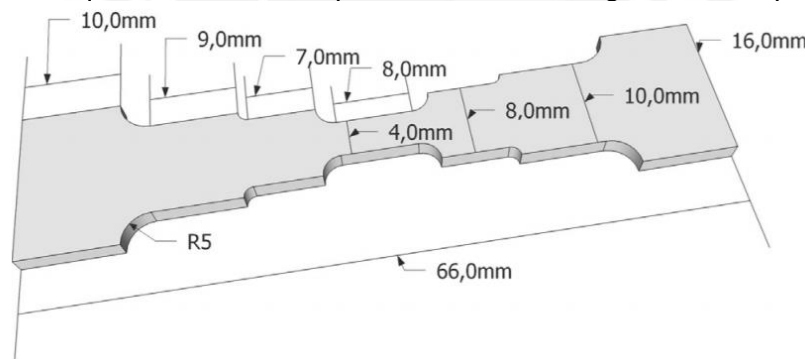
Figure 5 Strain at the yield point of the specimen, determined by ARAMIS

Figura 46. Deformación en el punto de fluencia del espécimen según el software GOM ARAMIS [23].



**Caso 9:** Correlación de imágenes digitales para analizar los esfuerzos locales de elementos fabricados de Ti6Al4V por EBM (electron beam melting) [24].

- a) Material evaluado: Para los ensayos realizados a nivel macro; el primer set de probetas consistió en cilindros de 10 mm de diámetro y 120 mm de altura, los cuales se manufacturaron en una máquina Arcam A1 usando polvo de entre 25 a 45 micrómetros de Ti6Al4V. El grosor de cada lámina (propia de la manufactura aditiva a la que pertenece la EBM) fue de 70 micrómetros. Fueron precalentados a una velocidad de escaneo de 20 000 mm/s y una corriente de entre 10 a 38 amperios con 15 pasadas, y se derritieron usando la tecnología registrada MultiBeam®. Las barras se maquinaron hasta alcanzar una longitud calibrada de 42 mm y 7 mm de diámetro según ASTM E8M. Por otro lado, para ensayos realizados a nivel micro; el segundo set de probetas fue manufacturado en dos bloques de Ti6Al4V usando una máquina Arcam S12, con polvo de Ti6Al4V de entre 45 a 100 micrómetros y un grosor de lámina de 70 micrómetros. Se usó una velocidad de escaneo de 14 600 mm/s y una corriente de 38 amperios con 22 pasadas. Se maquinaron seis probetas de 2 mm de grosor como se ve en la **Figura 47**. La dirección de impresión se desarrolló a lo largo de la parte más larga de los especímenes. Además, se pulió un lado de los especímenes usando un sistema Struers TegraPol-31 que usaba papel de carburo de silicio de grano 320 seguido de partículas de diamante de 9 micrómetros. Luego se realizó un pulido de óxidos con una solución Struers OP-S con partículas de 1 micrómetro de alúmina mezclado con agua. Se frotó la probeta con el líquido “Kroll 's etch” para hacer visible al grano de las probetas.

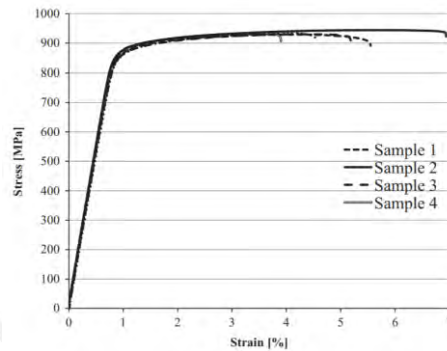


*Figura 47. Segundo set de probetas maquinado [24].*

- b) Ensayos realizados: Se realizaron ensayos de tracción para análisis a nivel macroscópico y a nivel microscópico, cada uno con diferentes parámetros de ensayo.
- c) Equipamiento: Se utilizó un equipo de tensión MTS Sintech 20D con una celda de carga de 100kN, además de un equipo de correlación de imágenes digitales GOM Aramis equipado con lentes microscópicos de 5x zoom.
- d) Parámetros de ensayo: Con respecto a los ensayos a nivel macro, se realizaron ensayos a tracción con una tasa de deformación de 0.1 mm/min. Se usó el equipo DIC en configuración de doble cámara. Se roció la probeta de un patrón de puntos negros y blancos. El equipo Aramis se programó para tomar imágenes cada dos segundos durante el ensayo. Se usó un tamaño de faceta de 20x20 píxeles con un tamaño de paso de 13 píxeles, con cada píxel correspondiendo a 17 micrómetros. Por otro lado, con respecto a los ensayos a nivel micro, se usó un equipo de capacidad de carga de 10 kN para la tracción del ensayo. Además, se empleó un zoom de 5X sobre la región pulida de las probetas. Los granos del material, notorios por el pulido de la probeta, sirvieron como el patrón necesario para el procedimiento DIC. La carga se aplicó manualmente hasta los 9.5kN, mas no se llegó a la rotura. Se usó un tamaño de faceta de 15x15 píxeles con un tamaño de paso de 13 píxeles, con cada píxel correspondiendo a 1.51 micrómetros. Para el otro lado no pulido de la probeta se

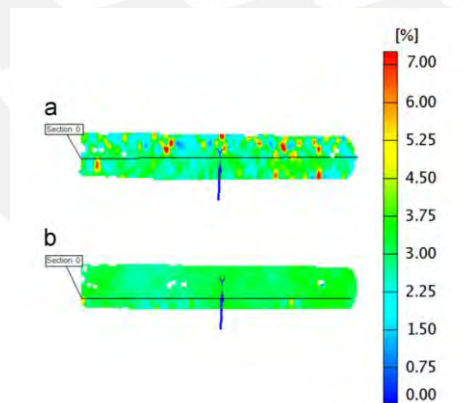
empleó un patrón usual de manchas negras sobre pintura blanca. Adicionalmente, el tamaño de la faceta fue de 15x15 píxeles con un tamaño de paso de 13 píxeles, con cada píxel correspondiendo a 16 micrómetros.

- e) Resultados: Al analizar los resultados de los ensayos a nivel macro se obtuvo una curva de esfuerzo/deformación unitaria (**Figura 48**). En dicha curva se pueden observar que el módulo de Young promedio tiene un rango de entre 102 y 111 MPa, además la resistencia última a la tensión fue de entre 930 y 945 MPa y la elongación a la rotura osciló entre 3.5 y 7%.



*Figura 48. Curva esfuerzo-deformación unitaria de las probetas de los ensayos a nivel macro [24]*

Además, el sistema ARAMIS tomó capturas de los campos de deformación en dos instantes distintos, uno a 3% de elongación y otro justo antes de la rotura. Se tomaron capturas a dichos campos de deformación usando el software para DIC. En la **Figura 49** se observan en la probeta 1, que representa a 2 de las 6 probetas ensayadas, algunas zonas de mayor deformación local, que pueden llegar a 7% de deformación; mientras que en la probeta 2 se observa una deformación más homogénea.



*Figura 49. Campo de deformación de probetas a ensayos macro a 3% de elongación. a) probeta 1, b) probeta 2 [24]*

En la **Figura 50** se observa el campo de deformación justo antes de la rotura. En la muestra 1 se siguen observando deformaciones locales grandes, que superan el 7%, mientras que globalmente la deformación es de 5%. Para la muestra 2 se observa un campo más uniforme con una deformación promedio de 7%, lo que se nota también en su curva esfuerzo-deformación anterior.

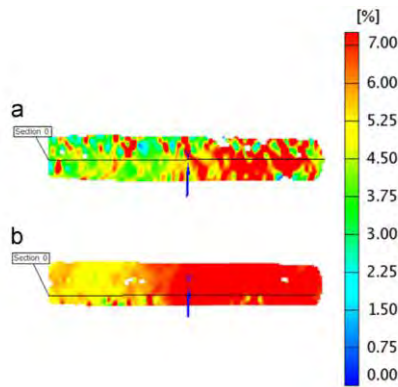


Figura 50. Campo de deformación de probetas a ensayos macro justo antes de la rotura. a) probeta 1, b) probeta 2 [24].

Con respecto a los resultados de los ensayos a nivel micro también se obtuvo una curva esfuerzo/deformación usando los datos del sistema ARAMIS (**Figura 51**). Se observa que el cambio entre deformación elástica y plástica corresponde correctamente al comportamiento de los campos de deformación observados a la misma deformación.

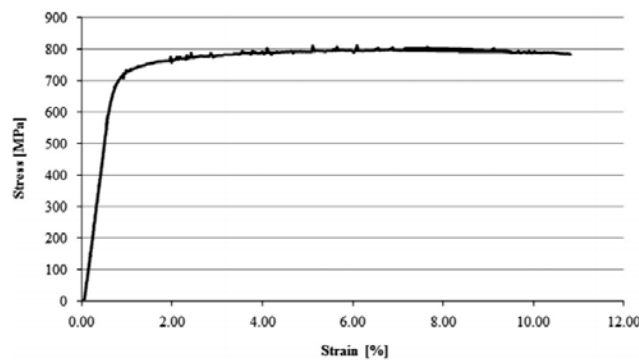


Figura 51. Curva esfuerzo-deformación de las probetas de los ensayos a nivel micro [24].

Además, la **Figura 52** presenta los campos de deformación desarrollados por el software ARAMIS.

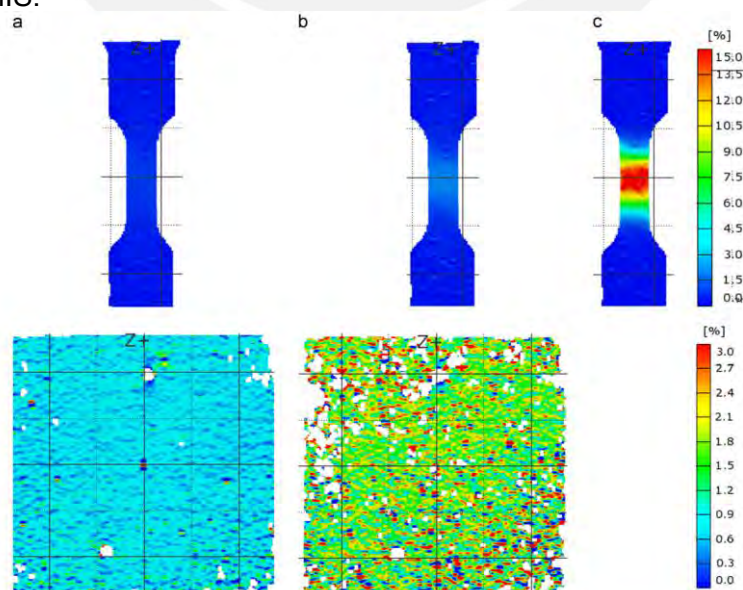
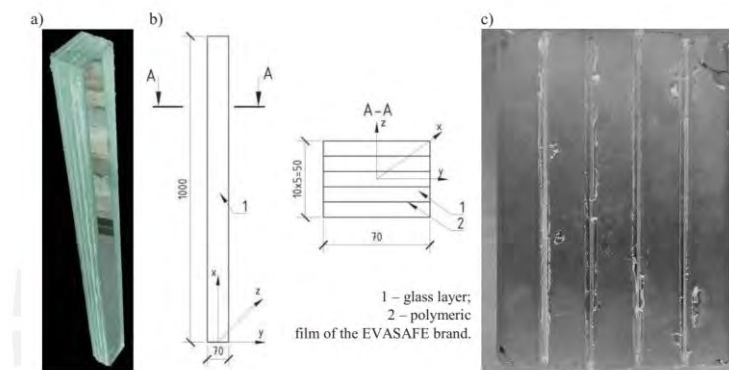


Figura 52. Arriba: Campos de deformación macro mostrando toda la probeta. Abajo: Campos de deformación micro mostrando una región de interés en la probeta. a) en la región elástica, b) en la región plástica, c) instantes antes de la rotura [24].

Se evidencian grandes deformaciones en pequeñas microrregiones a lo largo de la probeta en la zona de deformación plástica, mientras que en la región elástica se nota una deformación uniforme, incluso a nivel micro. Debido a la excesiva deformación a elongaciones superiores a 2.5% no se lograron incluir imágenes micro de los campos de deformaciones a elongaciones superiores a dicho número.

**Caso 10:** Estudio experimental de deformabilidad de columnas de capas de vidrio a compresión central y flexión usando correlación de imágenes digitales con cargas cuasiestáticas [25].

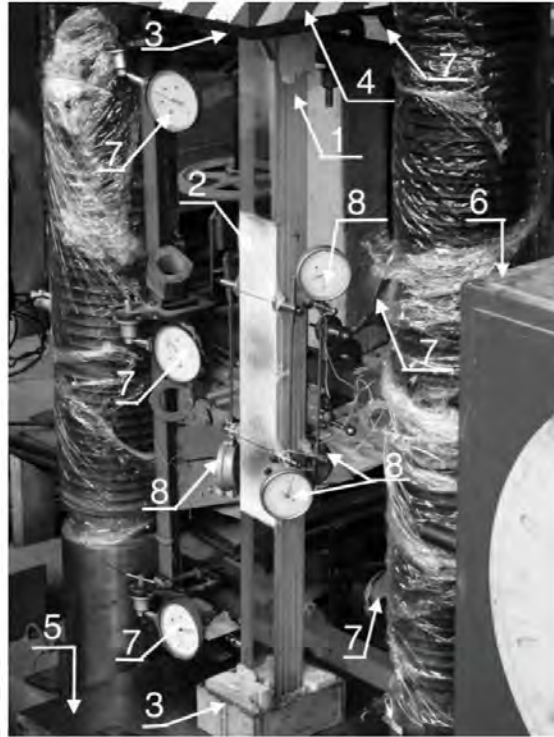
- a) Material evaluado: En el presente experimento se usaron muestras de la marca KS-2.1 y KS-2.2 de una lámina de vidrio M4 no prensado (según la norma ucraniana DSTU B V.2.7-122:2009). Las muestras se fabricaron usando la tecnología de triplexado. Entre cada capa se tiene una película del polímero EVASAFE (pegamento) con una capa para la columna de marca KS-2.1 y dos capas para la marca KS-2.2. Después se trataron a 130°C por 20-40 minutos. A continuación, la **Figura 53** muestra las características geométricas de las probetas.



*Figura 53. Columnas de vidrio multicapas con vistas tridimensionales, de construcción y laterales [25].*

- b) Ensayos realizados: Se realizó un ensayo de compresión axial, en el cual adicionalmente se midió la deflexión de la probeta al momento de aplicar la carga de compresión.
- c) Equipamiento: Se usó la prensa hidráulica PG-250, además se usaron seis deflectómetros Aislov para el ensayo a flexión, asimismo cinco microindicadores de tipo reloj 8. Finalmente, se usó una cámara Canon EOS 650 D. La **Figura 54** señala el *set-up* del experimento de manera más detallada.





*Figura 54. Vista del set-up del ensayo. 1- Columna de pruebas. 2- Superficie apta para medir con DIC. 3- Soportes metálicos. 4- Cabezal fijo de la prensa. 5- Cabezal móvil de la prensa. 6- Prensa PG-250. 7- Deflectómetro [25]*

- d) Procedimiento: Para el ensayo de compresión axial se incrementó la carga en intervalos de 25 kN hasta la rotura, la velocidad de obturación fue de 10 minutos. Con la finalidad de medir la flexión de la probeta durante la aplicación de la carga a compresión se emplearon 6 deflectómetros con un intervalo de escala de 0.01 mm y fueron ubicados a tres alturas de la columna a dos lados perpendiculares uno del otro. Para la medición de deformaciones longitudinales se utilizaron cinco microindicadores con un intervalo de escala de 0.001 mm y una base de medición de 200 mm. Al aplicar la técnica DIC en conjunto con estos tipos de medición se empleó un patrón irregular de manchas negras sobre una capa de pintura blanca a las columnas. Además, se emplearon indicadores tipo reloj en las otras tres caras de la columna. Se procesaron las imágenes usando un software propietario GOM.

e) Resultados: A continuación, se presenta la **Tabla 6** presenta un resumen de los resultados usando el software GOM comparados según sean de marca KS-2.1 o KS-2.2 y su carga instantánea.

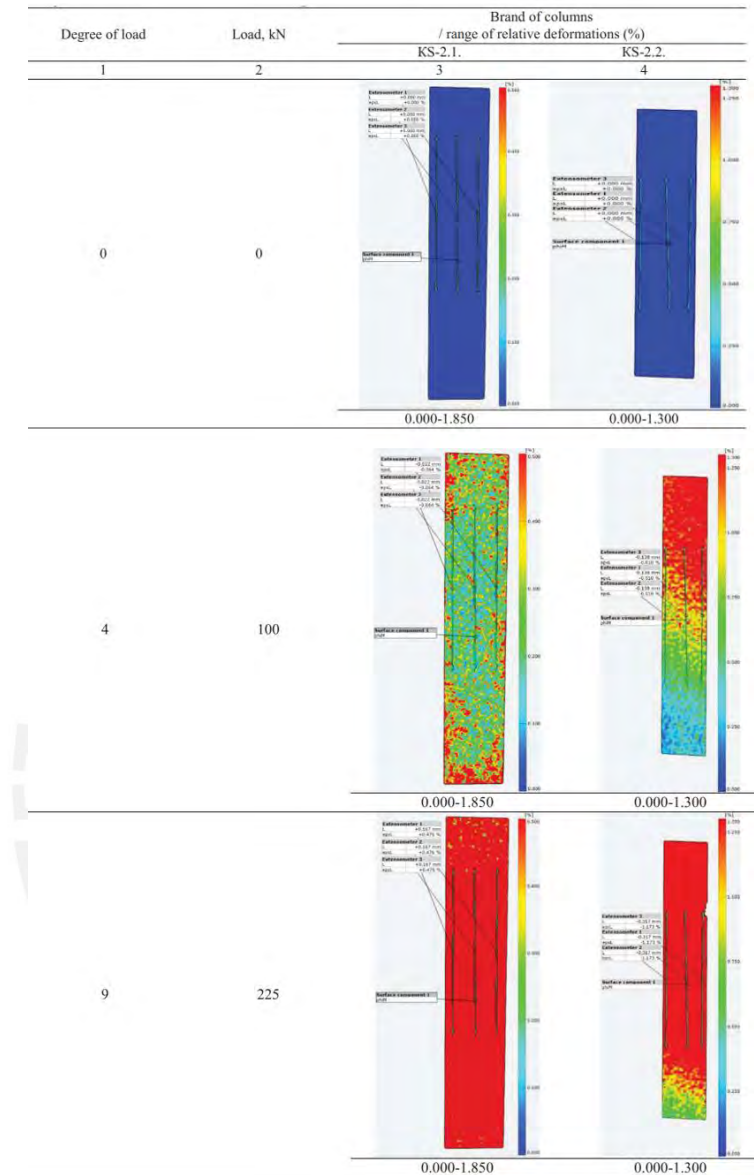
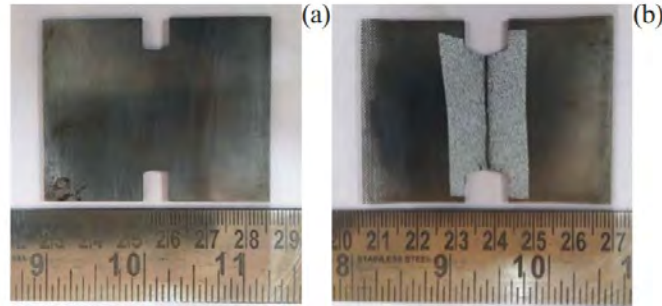


Tabla 6. Comparación de la elongación unitaria de acuerdo a la carga usando DIC [25].

Finalmente, es importante mencionar que dichos resultados se contrastan con la observación durante el experimento donde la primera fisura del vidrio ocurrió a 175 kN para ambas marcas. El colapso total de cada columna fue a las cargas de 270 y 265 kN para las marcas KS-2.1 y KS-2.2, respectivamente. Este colapso ocurrió, en ambos casos, cerca a la región del medio y con una flexión en el plano perpendicular a las uniones de pegamento entre capas. Además, para las columnas de marca KS-2.1 se obtuvo un esfuerzo máximo de 77.14 MPa y, para la marca KS-2.2, 75,71 MPa. Adicionalmente se observó que la marca KS-2.1 (con una sola capa de película o pegamento) tuvo una mayor deformación que la otra marca.

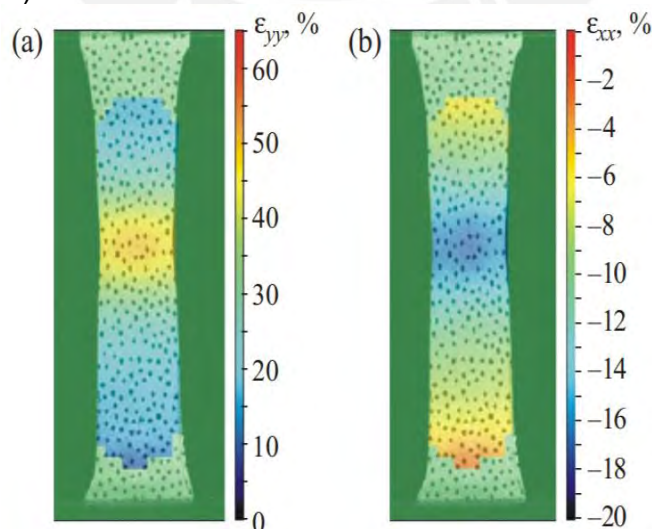
**Caso 11:** Generación de un diagrama límite de formación (FLD, por sus siglas en inglés) mediante el uso de ensayos de tracción uniaxiales y con muesca para deformaciones en el mismo plano de deformación usando correlación de imágenes digitales [26].

- a) Material evaluado: En este caso se utilizó una lámina de acero bifásico (ferrita y martensita) deformada en frío de 1.4 mm de grosor (**Figura 55**).



*Figura 55. Lámina de metal a) Antes del ensayo. b) Después del ensayo [26].*

- b) Ensayos realizados: Se realizaron ensayos de tracción uniaxiales empleando una probeta con muesca; se lograron medir deformaciones en el mismo plano de deformación.
- c) Equipamiento: El equipo empleado fue el equipo de correlación de imágenes digitales 2D Strainmaster LaVision, además se contó con un marco de pruebas servoelectrico de 35 kN de capacidad.
- d) Procedimiento: Los ensayos se realizaron hasta la fractura del material, además la cantidad de imágenes procesadas fue aproximadamente 100-200 por ensayo, por último, la tensión se aplica en dirección perpendicular a la muesca.
- e) Resultados: Los resultados del ensayo se muestran gráficamente usando el software del equipo LaVision. En la **Figura 56** se pueden observar las deformaciones en las dos direcciones principales sobre la lámina ensayada en un ensayo a tracción simple (lámina sin muesca).



*Figura 56. a) Mapa de deformación en el sentido longitudinal a la carga. b) Mapa de deformación en el sentido transversal [26]*

La **Figura 57** muestra la variación de la deformación a lo largo del ancho de la lámina (tomado transversalmente y por la mitad longitudinal de la lámina)..

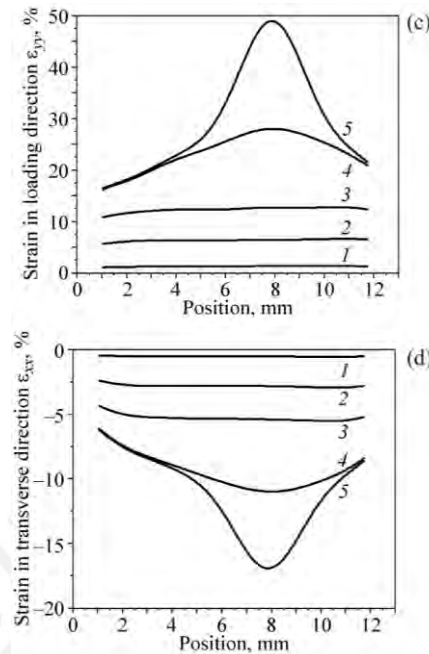


Figura 57. Deformación transversal en la mitad longitudinal de la probeta .1) 1.2% de elongación.2) 6.3% de elongación.3) 12.3% de elongación.4) 22.3%.5) 23,3%.  $\epsilon_{yy}$  es la dirección longitudinal de la carga y  $\epsilon_{xx}$  es la transversal [26].

Además, se observa en la **Figura 58** la deformación en las dos direcciones principales de deformación en un ensayo a tracción con muesca.

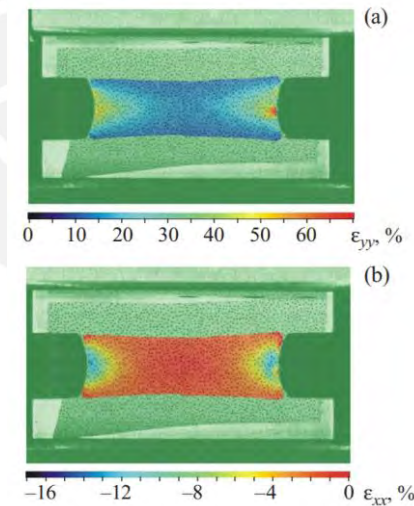


Figura 58. a) Mapa de deformación en el sentido longitudinal a la carga. b) Mapa de deformación en el sentido transversal [26].

Asimismo, a lo largo de la región de menor sección (área) se puede trazar una línea imaginaria para examinar la variación de la deformación de forma local a lo largo de esta sección. Además, se puede notar que a una deformación total mayor, la distribución de la deformación toma valores más opuestos, concentrándose las deformaciones más grandes en regiones pequeñas (**Figura 59**).

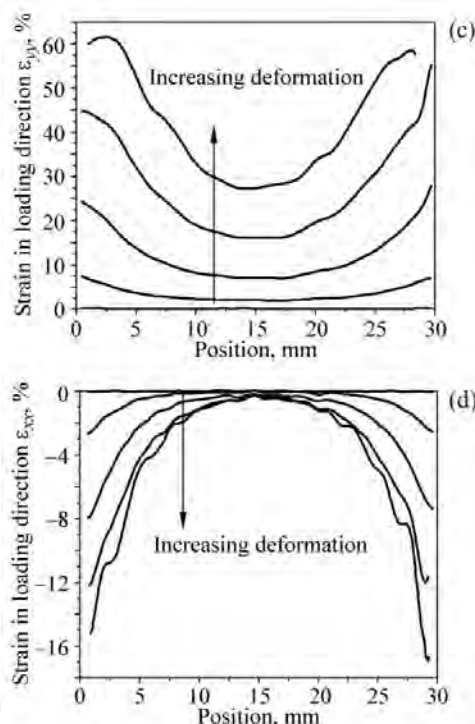


Figura 59. Deformación transversal en la mitad longitudinal de la probeta.  $\epsilon_{yy}$  es la dirección longitudinal de la carga y  $\epsilon_{xx}$  es la transversal [26].

**Caso 12:** Determinación del material requerido en las pestañas de agarre de láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) en ensayos a tracción, usando DIC [27].

- a) Material evaluado: En el presente experimento se utilizó un prepreg, el cual estaba compuesto por fibras de carbono T700 12K y una resina epóxica de la empresa KORDSA con el código de producto de KOM10 T700 12 KT UD300 37% 600 KOMP. El peso superficial de las fibras es de 300 g/m<sup>2</sup> y el contenido de resina es de 37% en masa. Adicionalmente, se utilizó otro prepreg, el cual estaba constituido por fibra de vidrio de tipo E con peso superficial de 300 g/m<sup>2</sup> con código KOM10 EGF UD330 de la empresa KORDSA y por resina epóxica OM10.
- La temperatura de transición del vidrio usado fue de 123°C. Para la fabricación de las probetas de fibra de carbono se preparó un molde de acero y se curaron las los prepreg dentro de él usando una prensa manual. Se produjeron 7 de esas probetas cada una con 8 capas de material con fibras en diferentes orientaciones (**Tabla 7**). Posteriormente se cortaron según el estándar ASTM D3039 para que se realicen las pruebas, con dimensiones de 25 x 2,5 cm con excepción de la probeta con dirección de fibras de 0°, la cual tuvo 1.5 cm de ancho en vez de 2.5 cm.

Layup orientation of prepared laminates.

Short ID	Layup orientation & sequence
0	[0°] <sub>s</sub>
15	[15°/0°/-15°/0°] <sub>s</sub>
30	[30°/0°/-30°/0°] <sub>s</sub>
45	[45°/0°/-45°/0°] <sub>s</sub>
60	[60°/0°/-60°/0°] <sub>s</sub>
75	[75°/0°/-75°/0°] <sub>s</sub>
90	[90°/0°/-90°/0°] <sub>s</sub>

Tabla 7. Orientación de cada capa de las 7 probetas de fibra de carbono con 0° referido a la dirección axial [27].



Al realizar la manufactura del material de las pestañas de agarre se fabricaron dos materiales distintos usando los dos prepregs, anteriormente mencionados, con secuencia de orientación de fibras de  $45^\circ$  y  $-45^\circ$  (respecto al eje vertical) superpuestos. Posteriormente se curaron de la misma manera en que se curaron las probetas, pero se dejó un acabado más áspero en la superficie.

Para la unión de las pestañas de agarre a las probetas se usó el epóxico Araldite 2011, de esta manera se obtuvieron dos sets de probetas, un set con pestañas de prepreg de fibra de carbono y el otro, de vidrio.

- b) Ensayos realizados: Se realizó un ensayo de tracción según la norma americana ASTM D3039 para materiales compuestos.
- c) Equipamiento: Se empleó la máquina de corte digital ZÜND G3-L3200 para el corte de probetas. Asimismo, para la medición del ensayo axial se usaron galgas extensiométricas biaxiales de código C2A-06-125LT-350 de la empresa VISHAY. El equipo de tracción fue una máquina de ensayos universal INSTRON 5982 con una celda de carga de 100 kN. Para la aplicación de la técnica DIC se necesitó de pinturas en spray de códigos RAL 9005 y 9010, además de un equipo GOM ARAMIS con sensor 12M.
- d) Parámetros de ensayo: Se usó una velocidad de 2 mm/min y los ensayos continuaron hasta la rotura del material. Se usó un tamaño de faceta de 25 píxeles y un tamaño de paso de 19 píxeles
- e) Procedimiento de ensayo: Para cada set de probetas se usaron dos probetas con sistema de medición de deformación a galgas extensiométricas biaxiales y una probeta con medición por DIC (**Figura 60**).

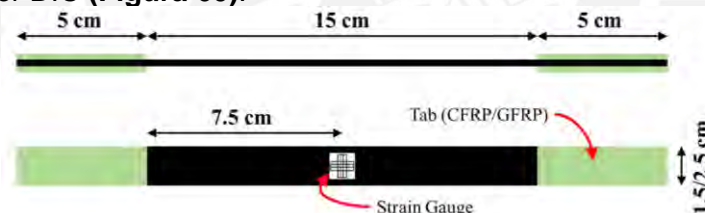


Figura 60. Dimensiones de la probeta a tracción con la ubicación de la galga extensiométrica a la vista [27].

Para el procedimiento DIC se produjo el patrón de manchas negras sobre pintura blanca necesario usando las pinturas en spray de códigos RAL 9005 y 9010. El sistema GOM ARAMIS se calibró con un objeto de calibración de 250 x 200 mm. Se usó el modo *single snap* para la calibración del sensor con una distancia de trabajo de 1250 mm y un ángulo de  $25^\circ$  en las cámaras. La desviación calculada de la calibración fue de 0.037 píxeles y la desviación de escala fue de 0.002 mm. Se tomaron referencias a la probeta previo al inicio del ensayo en su modo de imagen simple. Se usó el software ARAMIS para computar deformaciones lagrangianas, mapas de deformación y campos de deformación.

- f) Resultados: Los resultados demuestran que la mayor resistencia a la tracción se mostró en las probetas con orientación de fibras de  $0^\circ$ , y sus resistencias últimas a la tracción oscilan entre 1092 y 2082 MPa. Se observa que para probetas con orientación de fibras de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$  se tiene una mayor resistencia con las pestañas de fibra de carbono mientras que para el caso de  $45^\circ$  es independiente del material de la pestaña, y para  $75^\circ$  y  $90^\circ$  las pestañas de fibras de vidrio resultan en mejores resultados. También se halló el campo de deformación de las probetas de ambos materiales de la pestaña para las orientaciones de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . En la **Figura 61** se muestran dichos campos para 60, 80 y 100% de la resistencia última a la tracción hallada.

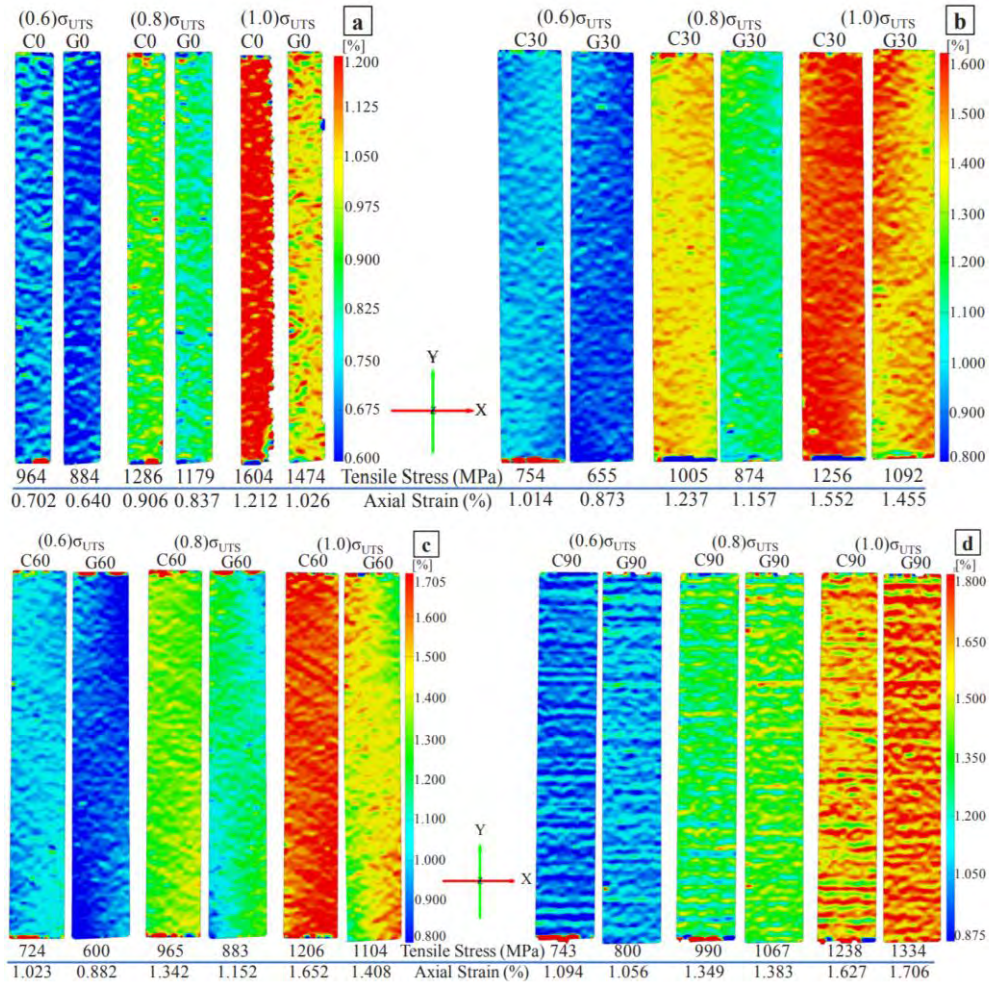


Figura 61. Las iniciales C indican pestañas de fibra de carbono y G de fibra de vidrio. a) Orientaciones de fibra a  $0^\circ$ , b) Orientaciones de fibra a  $30^\circ$ , c) Orientaciones de fibra a  $60^\circ$ , d) Orientaciones de fibra a  $90^\circ$ . Para todos los casos se observan tres etapas: a 60, 80 y 100% de la resistencia última registrada [27].

**Caso 13:** El uso de correlación de imágenes digitales para identificar características de falla de madera laminada cruzada (CLT) bajo carga transversal [28].

- a) **Material evaluado:** Se usaron dos tipos de paneles de CLT con diferentes espesores (105 mm y 145 mm). En el primer caso (CL3/105) se utilizaron 3 capas de madera para formar los paneles usando capas de 35 mm y en el segundo caso (CL5/145) se usaron cinco capas de 35, 20, 35, 20 y 35 mm respectivamente. Se usó madera de *Pinus radiata* australiano y se unieron las capas usando un adhesivo de poliuretano Purbond. Las capas superior e inferior usaron pino de grado estructural F7 y las interiores, F5. El módulo de elasticidad promedio y el módulo de corte fueron 8 GPa y 533 MPa, respectivamente, para la capa externa, y 6 GPa y 400 MPa, para la capa interna. Las densidades promedio de los paneles CL3/105 y CL5/145 fueron de 492 kg/m<sup>3</sup> y 483 kg/m<sup>3</sup>. Se emplearon probetas de largo 20 y 28 veces el espesor del CLT para ver resultados de resistencia y rigidez a la flexión y de 12 veces el espesor para ver la resistencia al corte.
- b) **Equipamiento:** Se dispuso de un equipo para ensayos y sensado (MTS), y 3 transductores láser para medir deformaciones locales y globales. Para registrar la falla del material en video se emplearon cámaras de video de 2 megapíxeles con un tamaño de píxeles de 7.38 micrómetros. Para el análisis DIC se usaron cámaras con resolución de 1920x1080 píxeles y el software GOM correlate.
- c) **Parámetros de ensayo:** Los ensayos se realizaron tal que la máxima carga aparecía a los  $300 \pm 120$  segundos. Para las cámaras se usó la resolución de 1980x 1080 píxeles y una tasa de fotogramas de 24 fps. El análisis en el software GOM correlate usó un fotograma por segundo para el procesamiento de imágenes. Se usó un tamaño de faceta de 19x19 píxeles de tal manera que tres puntos pintados se muestran por faceta, con una distancia entre puntos de 11 píxeles. Aproximadamente se manejó 0.29 mm/píxel. Además es importante mencionar que la carga empleada en el ensayo se basó en el estándar internacional EN 16351.
- d) **Procedimiento:** Los paneles CLT se ensayaron bajo flexión en cuatro puntos. Se usaron tres transductores láser LS1, LS2 y LS3, los LS1 y LS3 se usaron para medir deformaciones locales y el LS2 para medir deformaciones globales. A continuación la **Figura 62** muestra el set-up experimental.

a) Experimental test set-up



b) Schematic diagram and nomenclature of test set-up

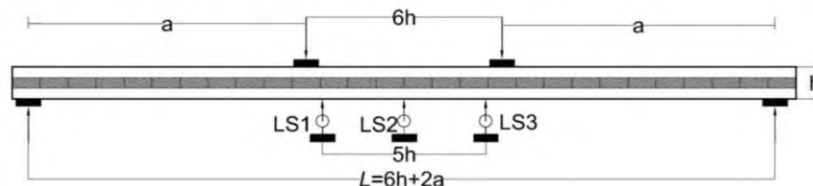


Figura 62. a) Set-up experimental, b) Diagrama esquemático de puntos de aplicación de fuerza (rectángulos sombreados) y transductores LS1, LS2 y LS3, Navaratnam [28].



En el uso de la técnica DIC la posición de las cámaras varió de acuerdo al tamaño de la probeta. Se utilizaron varias cámaras de 2 megapíxeles para poder cubrir el largo de la probeta y se sirvió de una plantilla para poder pintar el patrón de puntos negros sobre matriz blanca necesario para el GOM. El promedio del patrón de puntos aplicado a la superficie de la probeta fue de 7.1 puntos/cm<sup>2</sup> con un diámetro de puntos de 2 mm. Por otro lado, se utilizaron luces fluorescentes para iluminar el área (**Figura 63**). Además, se empleó el software GOM Correlate y se compararon los resultados hallados usando DIC con los obtenidos por los transductores, para de esta manera realizar la validación de los mismos. Para el procesamiento de imágenes se dispuso el método de cómputo de “más puntos” (opción del software GOM Correlate), el cual es útil para asegurar que aún las áreas que tengan baja densidad de puntos puedan ser analizadas. En total se efectuaron diez ensayos para cada longitud de 12, 20 y 28 el espesor de la probeta.

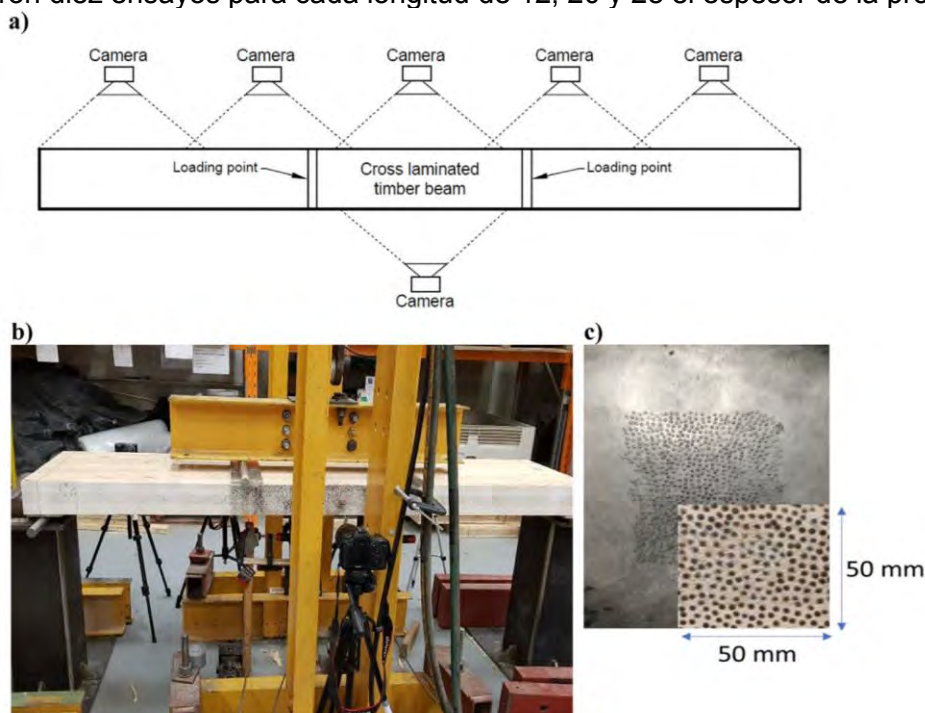


Figura 63. a) configuración de cámaras para análisis DIC, b) set-up del ensayo con una sola cámara observada, ubicada a 300 de la probeta, c) plantilla usada para realizar el patrón para el DIC [28].

e) Resultados: La **tabla 8** resume los resultados para cada configuración de probeta describiendo la carga a la que falla y su tipo de falla.

Specimen label	Number of samples	Number of layers	Span (mm)	Average results					Most common failure mode
				Experimental bending stiffness, $EI \times 10^{11}$ (Nmm <sup>2</sup> )			Failure load (kN)	Failure strength (MPa)/COV	
				$EI_{int}$	$EI_{mg}$ with $G = \infty$	$EI_{mg}$ with $G = 533$			
Shear Test									
CL3/105/1260	9	3	1260	3.96	3.76	4.01	157	2/0.08	Shear
CL5/145/1740	10	5	1740	14.28	13.94	15.02	212	1.8/0.06	Shear & delamination
Bending Test									
CL3/105/2100	10	3	2100	5.11	4.42	4.57	92	27/0.15	Tensile & Delamination
CL3/105/2940	10	3	2940	5.14	4.66	4.75	51	23/0.07	Tensile & Delamination
CL5/145/2900	10	5	2900	9.96	9.78	10.06	102	29/0.14	Tensile & Delamination
CL5/145/4020	10	5	4020	9.82	9.59	9.73	60	27/0.19	Tensile & Delamination

Tabla 8. Resumen de resultados de los experimentos para cada configuración de probeta [28].

La **Figura 64** presenta un ejemplo del uso de DIC en conjunto con las cámaras de video para predecir la propagación de fallas, en la probeta CL3/105/1260 se puede observar la aparición de tres fallas; las fisuras 1 y 3 son típicas de delaminación y la 2 típica de corte.

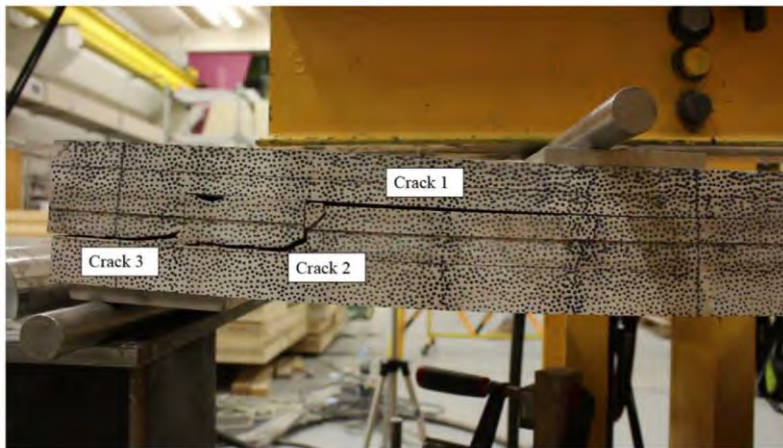


Figura 64. Fisuras presentes en la probeta CL3/105/1260 [28].

Usando DIC y el programa GOM Correlate se puede predecir la presencia de futuras grietas o fisuras al observar el campo de deformación. En este caso las zonas de mayor deformación local son las zonas que luego albergan el inicio de una falla en la probeta, lo cual se observa en el campo de deformación (**Figura 65**). Adicionalmente, la **Figura 65** evidencia la evolución de estas fallas en el tiempo.

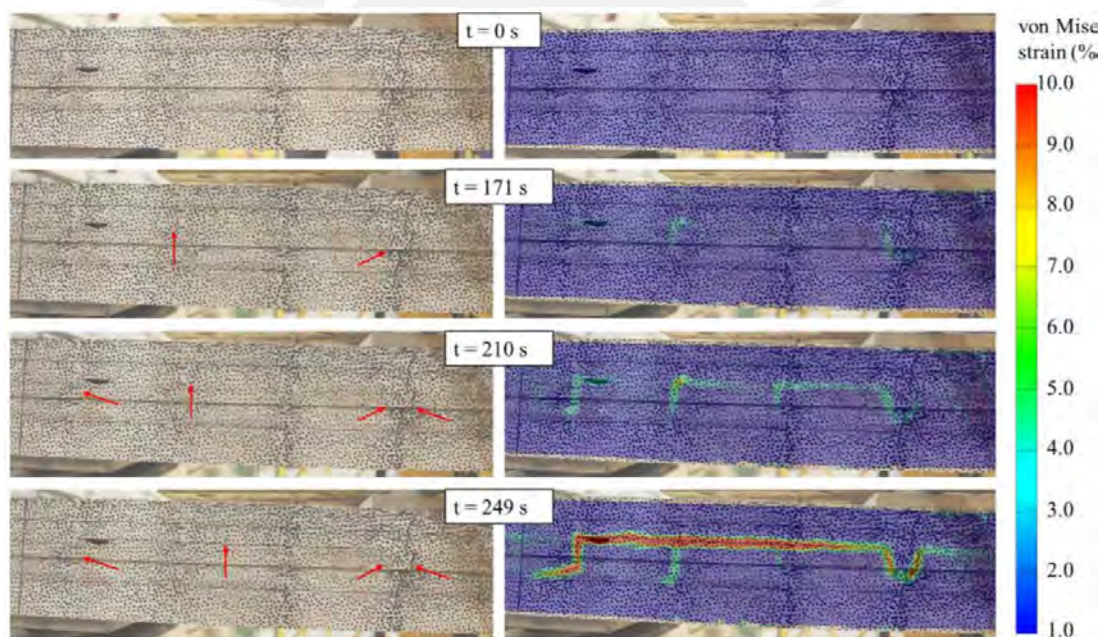
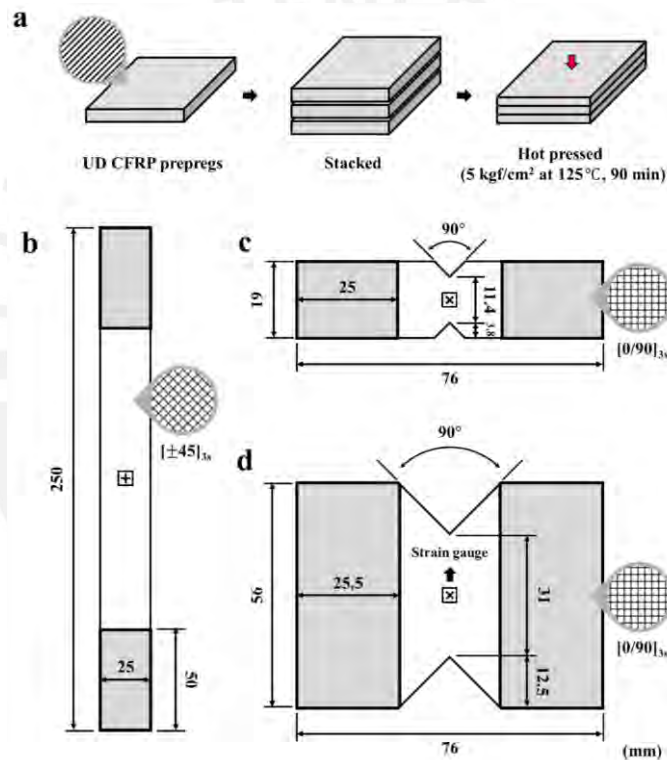


Figura 65. Predicción de las fallas por delaminación y corte usando DIC para ver los campos de deformación en la probeta CL3/105/1260. Las flechas rojas indican el inicio de las fisuras o grietas [28].



**Caso 14:** Determinación del módulo de corte coplanar a probetas de plásticos reforzados con fibra de carbono unidireccionales utilizando correlación de imágenes digitales [29].

- a) Material evaluado: Se usaron prepregs de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) de tipo unidireccional (UD) de la empresa SKYFLEX con código USN 150Y y de un espesor de 0.167 mm, los cuales estaban compuestos por fibra de carbono de alta resistencia Pyrofil TR50S y por una resina epóxica K51 epoxy. Además, se emplearon laminados usando varias capas de estos prepregs fabricados mediante el prensado de estos en caliente con las fibras de cada capa en distintas orientaciones. Para el ensayo tipo losipescu (ASTM D5379-12) y método de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078-12), se usó una secuencia de apilamiento de  $[0/90]_{3s}$ , mientras que para el ensayo de corte coplanar  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18) se usó la secuencia  $[\pm 45]_{3s}$ . Los laminados se cortaron con geometrías de acuerdo a las normas ASTM D3039-17, ASTM D3518-18, ASTM D5379-12 y ASTM D7078-12. Finalmente, se fabricaron 5 probetas por cada ensayo ASTM realizado, en la **Figura 66** se muestran las configuraciones de las probetas.



- b) Ensayos realizados: Se realizaron tres ensayos de corte, los cuales estaban dirigidos a materiales compuestos.
- Ensayo de corte con método losipescu ó de probeta con muesca en V (ASTM D5379-12)
  - Método de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078-12)
  - Ensayo de corte coplanar  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18).

- c) Equipamiento: Se usaron galgas extensiométricas tipo roseta de dos elementos con una longitud calibrada de 2 mm para medir deformaciones locales de corte y tracción. Para los ensayos se empleó un equipo de tracción Instron 5584 y una Instron 5582, además se empleó el equipo GOM ARAMIS para aplicar la técnica DIC.
- d) Procedimiento: En el ensayo de corte coplanar a  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18) se utilizó una máquina de ensayos a tracción Instron 5584. Además, se usaron laminados de 2 mm de grosor y una velocidad de ensayo de 1.5 mm/min de acuerdo a norma. En la **Figura 67** se observa el *set-up* experimental para este y los otros ensayos.

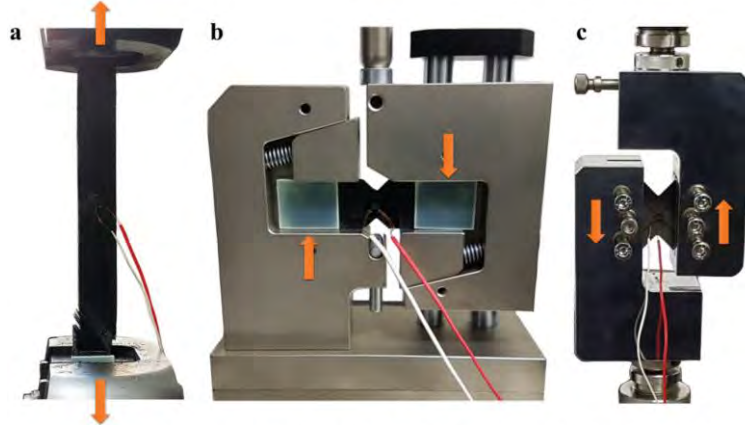


Fig. 2. Experimental setups and test fixtures for the (a)  $\pm 45^\circ$  in-plane, (b) losipescu, and (c) V-notched rail shear tests.

*Figura 67. a) Set-up del ensayo de corte coplanar  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18) b) Set-up para ensayo losipescu (ASTM D5379-12). c) Set-up para ensayo de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078-12 [29]).*

Por otro lado, para el ensayo losipescu o de probeta con muesca en V (ASTM D5379-12) se utilizó una máquina de ensayos a tracción Instron 5582. Además, se usaron laminados de 2mm de grosor y se usó una velocidad de ensayo de 2 mm/min de acuerdo a norma. De manera similar en el ensayo de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078-12) también se utilizó una máquina de ensayos a tracción Instron 5582, laminados de 2mm de grosor y se usó una velocidad de ensayo de 2 mm/min de acuerdo a la norma.

Es importante mencionar que para todos los ensayos se empleó el equipo GOM ARAMIS con dos cámaras con un patrón de puntos negros sobre pintura blanca. El *set-up* se muestra a continuación en la **Figura 68**.



*Figura 68. Set-up experimental del equipo GOM ARAMIS durante el ensayo ASTM D5379-12 [29].*

- e) Resultados: Para cada tipo de ensayo realizado se obtuvieron 5 curvas de esfuerzo deformación. En la **Figura 69** se observan los resultados de 5 probetas por ensayo, además se realizó una comparación entre los tipos de ensayo. Se puede observar que en el ensayo de corte coplanar  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18) el esfuerzo registrado es menor que en los otros dos ensayos. También se observó que la variación de las curvas en el ensayo losipescu o de probeta con muesca en V (ASTM D5379-12) considerablemente mayor y por ende de menor fiabilidad.

Además, la distribución del campo de corte para una deformación de 4% para los tres ensayos antes mencionados, se puede observar, en la **Figura 70**.

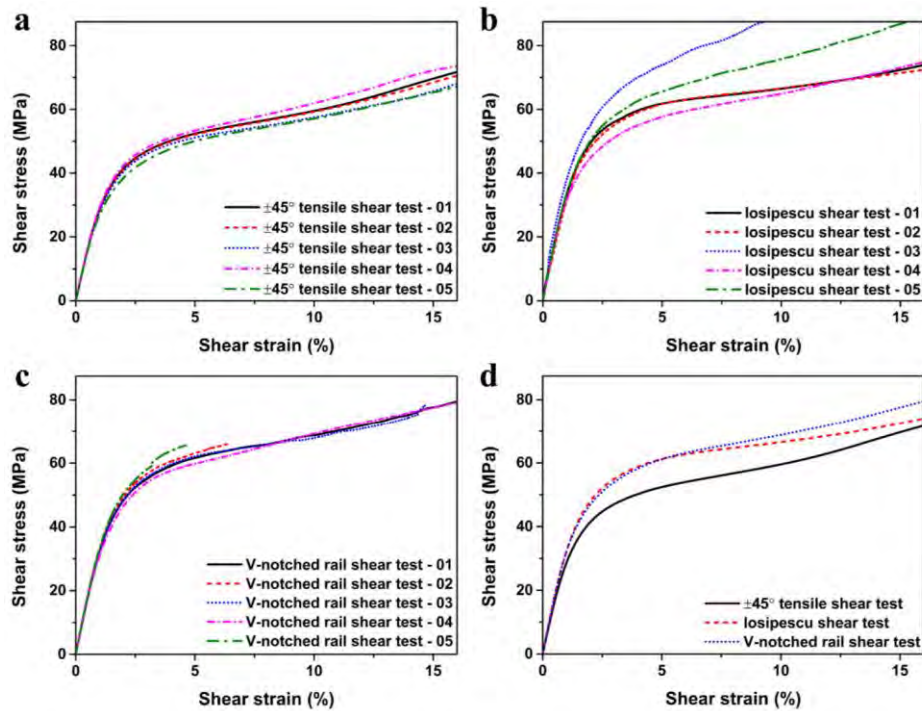


Figura 69. a) Curva esfuerzo-deformación del ensayo de corte coplanar  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18) b) Curva esfuerzo-deformación para ensayo losipescu (ASTM D5379-12). c) Curva esfuerzo-deformación para ensayo de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078-12). d) Comparación de los tres ensayos en una sola gráfica [29].

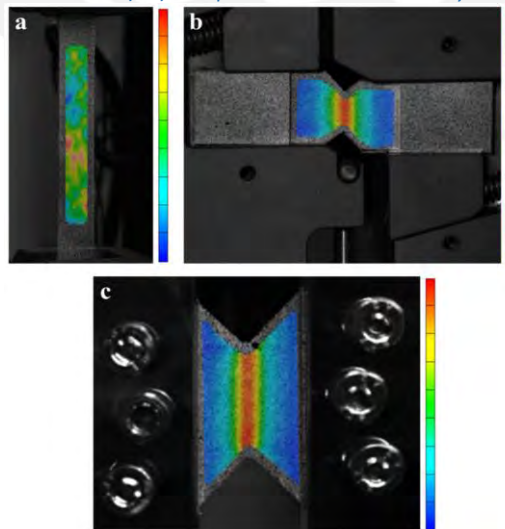
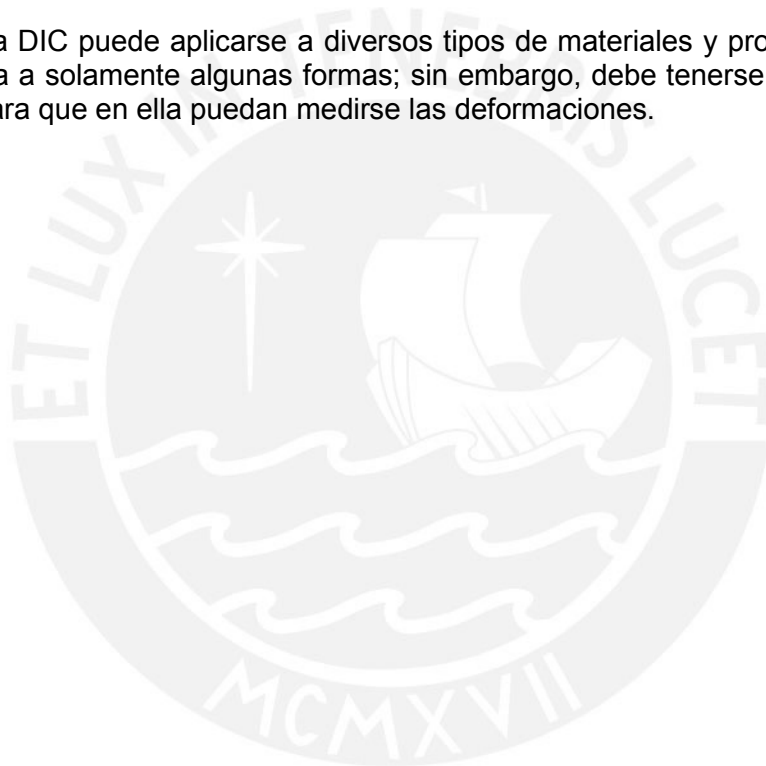


Figura 70. Distribuciones de corte usando DIC al 4% de deformación para ensayos a) de corte coplanar  $\pm 45^\circ$  (ASTM D3518-18) b) losipescu (ASTM D5379-12). c) de corte con riel con muesca en V (ASTM D7078-12) [29].

## 5. Conclusiones:

- Se ha desarrollado una compilación de la literatura disponible hasta la fecha y el estado del arte de la técnica DIC y su aplicación en ensayos de materiales.
- En la mayoría de los casos el equipamiento estándar de la técnica incluye: Cámaras, computador, sistema de montaje, uniones adecuadas y un equipo que aplique fuerza a las mordazas.
- Se puede utilizar la técnica DIC para medir deformaciones en diversos tipos de materiales siguiendo procedimientos dictados por normas.
- La técnica DIC permite obtener la deformación en la superficie de la probeta y representarla de manera visual, para un rápido y fácil entendimiento de lo que ocurre en ella.
- La técnica DIC puede aplicarse a diversos tipos de materiales y probetas, no está restringida a solamente algunas formas; sin embargo, debe tenerse una superficie tratada para que en ella puedan medirse las deformaciones.



## 6. Bibliografía:

- [1] Viggiani, G., & Hall, S. A. "Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics", *Fourth symposium on deformation characteristics of geomaterials*, vol. 1, pp. 3-26, 2008.
- [2] X. Poulain, L. Kohlman, W. Binienda, G. Roberts, R. Goldberg and A. Benzerga, "Determination of the intrinsic behavior of polymers using digital image correlation combined with video-monitored testing", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, no. 11-12, pp. 1869-1878, 2013. Available: 10.1016/j.ijsolstr.2013.01.041.
- [3] R. Goldberg, G. Roberts and A. Gilat, "Implementation of an Associative Flow Rule Including Hydrostatic Stress Effects into the High Strain Rate Deformation Analysis of Polymer Matrix Composites", *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 18-27, 2005. Available: 10.1061/(asce)0893-1321(2005)18:1(18)
- [4] M. Sutton, J. Yan, V. Tiwari, H. Schreier and J. Orteu, "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, no. 10, pp. 746-757, 2008. Available: 10.1016/j.optlaseng.2008.05.005.
- [5] B. Pan, L. Yu and D. Wu, "High-Accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements with Bilateral Telecentric Lenses: Error Analysis and Experimental Verification", *Experimental Mechanics*, vol. 53, no. 9, pp. 1719-1733, 2013. Available: 10.1007/s11340-013-9774-x.
- [6] F. Shadmehri and S. Hoa, "Digital Image Correlation Applications in Composite Automated Manufacturing, Inspection, and Testing", *Applied Sciences*, vol. 9, no. 13, p. 2719, 2019. Available: 10.3390/app9132719.
- [7] F. Ackermann, "Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry.", *The Photogrammetric Record*, vol. 11, no. 64, pp. 429-439, 1984.
- [8] W. Peters, W. Ranson, M. Sutton, T. Chu and J. Anderson, "Application Of Digital Correlation Methods To Rigid Body Mechanics", *Optical Engineering*, vol. 22, no. 6, 1983. Available: 10.1117/12.7973231.
- [9] T. Chu, W. Ranson and M. Sutton, "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics", *Experimental Mechanics*, vol. 25, no. 3, pp. 232-244, 1985. Available: 10.1007/bf02325092.
- [10] S. Metwalli, A. Ragab, A. Kamel and A. Saheb, "Determination of plastic stress-strain behavior by digital-image-processing techniques", *Experimental Mechanics*, vol. 27, no. 4, pp. 414-422, 1987. Available: 10.1007/bf02330316.
- [11] W. Peters, M. Sutton, W. Ranson, W. Poplin and D. Walker, "Whole-field experimental displacement analysis of composite cylinders", *Experimental Mechanics*, vol. 29, no. 1, pp. 58-62, 1989. Available: 10.1007/bf02327782.
- [12] J. Turner and S. Russell, "Application of digital image analysis to strain measurement at elevated temperature", *Strain*, vol. 26, no. 2, pp. 55-59, 1990. Available: 10.1111/j.1475-1305.1990.tb00026.x.



- [13] Reynolds, A. P., & Duvall, F, "Digital image correlation for determination of weld and base metal constitutive behavior", *Welding journal-New York*, vol 78, pp. 355, 1999.
- [14] M. Sutton, J. Yan, V. Tiwari, H. Schreier and J. Orteu, "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, no. 10, pp. 746-757, 2008. Available: 10.1016/j.optlaseng.2008.05.005.
- [15] Bigger R, Blaysat B, Boo C, et al. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. 2018.
- [16] Lopez-Anido, R., El-Chiti, F. W., Muszyński, L., Dagher, H. J., Thompson, L., & Hess, P. E. Composite material testing using a 3-D digital image correlation system. 2004.
- [17] Barile, C., Casavola, C., & Pappaletta, G. "Compression Tests on CFRP Analysed by Digital Image Correlation". In *Advancement of Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics*, vol. 3, pp. 185-192, 2019.
- [18] H. Espinosa, "Identification of Deformation Mechanisms in Biomaterials Through AFM and Digital Image Correlation", In *Advancement of Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics*, vol. 3, pp. 89-93, 2019.
- [19] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk and S. Amziane, "Failure mechanism of fibre reinforced concrete under splitting test using digital image correlation", *Materials and Structures*, vol. 48, no. 8, pp. 2713-2726, 2014. Available: 10.1617/s11527-014-0348-x.
- [20] M. Fard, Y. Liu and A. Chattopadhyay, "Characterization of Epoxy Resin Including Strain Rate Effects Using Digital Image Correlation System", *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 308-319, 2012. Available: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000127.
- [21] H. Daiyan, E. Andreassen, F. Grytten, H. Osnes and R. Gaarder, "Shear Testing of Polypropylene Materials Analysed by Digital Image Correlation and Numerical Simulations", *Experimental Mechanics*, vol. 52, no. 9, pp. 1355-1369, 2012. Available: 10.1007/s11340-012-9591-7.
- [22] H. Koerber, J. Xavier and P. Camanho, "High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation", *Mechanics of Materials*, vol. 42, no. 11, pp. 1004-1019, 2010. Available: 10.1016/j.mechmat.2010.09.003.
- [23] M. Milosevic et al., "Digital image correlation in analysis of stiffness in local zones of welded joints", *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, vol. 23, no. 1, 2016. Available: 10.17559/tv-20140123151546.
- [24] J. Karlsson, T. Sjögren, A. Snis, H. Engqvist and J. Lausmaa, "Digital image correlation analysis of local strain fields on Ti6Al4V manufactured by electron beam melting", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 618, pp. 456-461, 2014. Available: 10.1016/j.msea.2014.09.022.

- [25] B. Demchyna, M. Surmai and R. Tkach, "The experimental study of glass multilayercolumns using digital image correlation", *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 1, no. 96, pp. 32-41, 2019. Available: 10.5604/01.3001.0013.1990.
- [26] S. Paul, S. Roy, S. Sivaprasad and S. Tarafder, "Forming Limit Diagram Generation from In-Plane Uniaxial and Notch Tensile Test with Local Strain Measurement through Digital Image Correlation", *Physical Mesomechanics*, vol. 22, no. 4, pp. 340-344, 2019. Available: 10.1134/s1029959919040106.
- [27] I. Tabrizi et al., "Determining tab material for tensile test of CFRP laminates with combined usage of digital image correlation and acoustic emission techniques", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 127, p. 105623, 2019. Available: 10.1016/j.compositesa.2019.105623.
- [28] S. Navaratnam, T. Ngo, P. Christopher and S. Linforth, "The use of digital image correlation for identifying failure characteristics of cross-laminated timber under transverse loading", *Measurement*, vol. 154, p. 107502, 2020. Available: 10.1016/j.measurement.2020.107502.
- [29] J. Choi et al., "Determination of the in-plane shear modulus of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics using digital image correlation and finite-element analysis", *Composite Structures*, vol. 229, p. 111392, 2019. Available: 10.1016/j.compstruct.2019.111392.